

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE
EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA**

**VARIACIÓN DE CADMIO EN ZONA DE
SURGENCIAS DE LA COSTA NOROCCIDENTAL DE
BAJA CALIFORNIA**

**TESIS
MAESTRÍA EN CIENCIAS**

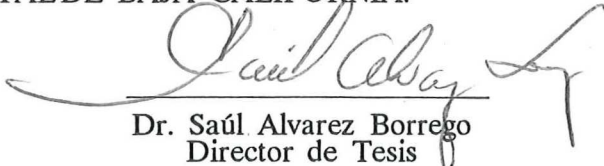
JOSÉ ANTONIO SEGOVIA ZAVALA

Ensenada, Baja California, México, marzo de 1994.

RESUMEN de la Tesis de José Antonio Segovia Zavala presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO en CIENCIAS en OCEANOGRAFIA con opción en ECOLOGIA MARINA. Ensenada, Baja California, México. Marzo de 1994.

VARIACION DE CADMIO EN ZONA DE SURGENCIAS DE LA COSTA NOROCCIDENTAL DE BAJA CALIFORNIA.

Resumen aprobado por:

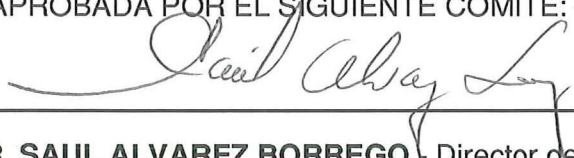


Dr. Saúl Álvarez Borrego
Director de Tesis

Del 21 al 26 de junio de 1990 se realizó un crucero en el buque oceanográfico "El Puma" en la zona entre la frontera México-EUA y Ensenada, B. C. El objetivo fue caracterizar y explicar la distribución del cadmio en una zona de surgencia costera. Para este propósito se realizó un análisis hidrográfico, un análisis multivariado y un balance de masas. El plan de crucero consistió de 35 estaciones de las cuales ocho incluyeron muestreos para el análisis del cadmio total. Además del cadmio se midió temperatura, salinidad, oxígeno, nitratos, fosfatos y clorofila "a". El cadmio se analizó con técnicas de ultralimpieza. Las características hidrográficas y una imagen de satélite en el infrarojo generada en el período de muestreo indican la presencia de una surgencia costera con afloramiento de agua subsuperficial de la Corriente de California y con mínima influencia de la Contracorriente de California. Se presentaron dos lenguetas de agua fría (13°C) de la costa hacia mar abierto: una frente a Punta Descanso, B. C. y la otra al Sur de la frontera México-EUA. Las concentraciones de cadmio sobre la plataforma fueron hasta 5.5 veces mayores que las de mar abierto (50 km). Las más bajas concentraciones fueron 0.03 y 0.058 nM en las estaciones de mar abierto, mientras que las máximas fueron 0.166 y 0.14 nM, cerca de la costa frente a la frontera México - EUA y Punta Descanso B. C., respectivamente. El análisis multivariado sugiere que la distribución del cadmio se explica por procesos físicos y biológicos como son la surgencia y la biomasa fitoplanctónica. El balance de masas indica que la principal fuente de cadmio al área de estudio es la surgencia (42.0 kg d^{-1}), en segundo término la advección (17.5 kg d^{-1}) y en un menor grado las fuentes antropogénicas (5 kg d^{-1}). Sin embargo, éstas últimas son similares al aporte natural de la Corriente de California cuando está tiene su velocidad mínima.

TESIS DEFENDIDA POR: **JOSE ANTONIO SEGOVIA ZAVALA**

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE:



DR. SAUL ALVAREZ BORREGO.- Director del Comité



M.C. GILBERTO GAXIOLA CASTRO.- Miembro del Comité



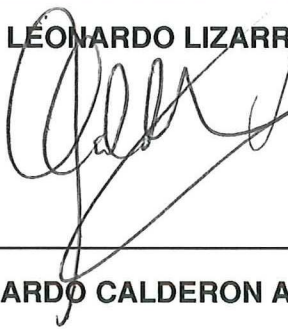
DR. MARCIAL LEONARDO LIZARRAGA PARTIDA.- Miembro del Comité



DR. HERIBERTO MARQUEZ BECERRA.- Miembro del Comité



DR. MARCIAL LEONARDO LIZARRAGA PARTIDA.- Jefe Depto. Ecología Marina



DR. LUIS EDUARDO CALDERON AGUILERA.- Director de Estudios de Posgrado

21 DE MARZO DE 1994



**CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE EDUCACION
SUPERIOR DE ENSENADA**

**DIVISION DE OCEANOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ECOLOGIA MARINA**

*VARIACION DE CADMIO EN ZONA DE SURGENCIAS DE LA
COSTA NOROCCIDENTAL DE BAJA CALIFORNIA*

T E S I S

**Que para cubrir parcialmente los requisitos
necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS presenta:**

JOSE ANTONIO SEGOVIA ZAVALA.

Ensenada, B.C. marzo de 1994.

DEDICATORIA

A María de Jesús, por su amor, apoyo y comprensión.

A Karla, Perla y José Manuel, por inspirar mi superación.

A mis padres, por su apoyo incondicional.

A mis hermanos, Miguel Angel y Rosalinda.

A la memoria de mi abuela Esperanza, por su ejemplo y fortaleza durante mi infancia y adolescencia.

A la memoria de mi sobrino Miguel Angel, por su ejemplo ante sus padres y compañeros.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Saúl Alvarez Borrego, por su apoyo y dedicación para la realización de este trabajo.

Al M. en C. Gilberto Gaxiola Castro, Dr. Leonardo Lizárraga Partida y Dr. Heriberto Márquez Becerra, por sus acertados comentarios y revisiones que ayudaron a mejorar este trabajo.

A los colegas M. en C. Francisco Delgadillo Hinojosa y Oc. Albino Muñoz Barbosa por su apoyo logístico en el trabajo de campo, análisis y comentarios para la realización de este trabajo. Así mismo, por compartir la experiencia académica en el proyecto "Estudio Marino de Contaminación Fronteriza México-E.U.A."

Al Dr. Sergio Sañudo Wilhelmy y al Cand. a Dr. Ignacio Rivera Duarte, por su apoyo técnico durante mi estancia en la Universidad de California en Santa Cruz, E.U.A.

A la Secretaría de Educación Pública por su apoyo económico mediante el convenio DGICSA 880531.

Al Instituto de Investigaciones Oceanológicas, por su apoyo económico para desarrollar este trabajo.

A Rosa María Trujillo Brambila por su apoyo en el mecanografiado de este trabajo.

A Ramón Moreno y Gilberto Fuentes por la elaboración de las figuras y tablas de este trabajo.

Y a todos aquellos que de algún modo participaron en la elaboración de este trabajo.

CONTENIDO

I INTRODUCCION	1
II DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO	4
III METODOLOGIA	6
III.1 Muestreo y Análisis	6
III.2 Procesamiento de Datos	10
III.2.1 Análisis Estadístico Multivariado	10
III.2.2 Balance de Masa	11
III.2.3 Hidrografía	15
IV RESULTADOS	16
IV.1 Hidrografía	16
IV.2 Cadmio	22
IV.3 Análisis Multivariado	25
IV.4 Balance de Masa	25
V DISCUSION	29
VI CONCLUSIONES	40
LITERATURA CITADA	41

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Localización del área de estudio y distribución de estaciones de muestreo. Estaciones donde se obtuvieron muestras de cadmio (●) y variables hidrológicas (●). Estaciones donde solamente se obtuvieron variables hidrológicas (●).	7
2	Prisma triangular considerado para el balance de masas del cadmio.	12
3	Distribución horizontal de temperatura a 10 m. de profundidad (a) y vientos medidos en el área de estudio (b). * vientos medidos en la serie de tiempo donde se realizó el estudio de la variación diurna del 21 al 22 de junio .	17
4	Imagen de satélite del infrarojo con temperatura superficial del 24 de junio de 1990.	18
5	Distribución vertical de temperatura (a) y salinidad (b). A es el lado norte del cubo; B es el lado paralelo y a 50 km de la costa y C es el lado sur del cubo.	19
6	Distribución vertical de densidad (a) y fosfatos (b). A es el lado norte del cubo; B es el lado paralelo y a 50 km de la costa y C es el lado sur del cubo. El fosfato esta en uM.	21
7	Concentración de cadmio (nM) en el área de estudio a diferentes niveles de profundidad. (a) 10 m., (b) entre 20-30 m. y (c) entre 50-150. La zona sombreada es el borde de la plataforma entre 60-100 m de profundidad.	23
8	Distribución vertical al borde de la plataforma continental de cadmio (a), temperatura (b), clorofila (c), salinidad (d), nitrato (e) y fosfato (f). El transecto está orientado de norte a sur y a 15 km de la costa.	24
9	Análisis de agrupamiento del cadmio con las variables conservadoras y no conservadoras.	26
10	Diagramas T-S .a) En toda el área de estudio y b) Solamente en la zona de surgencia. Las masas de agua se identifican de acuerdo a Kin'dyushev (1970). donde: MACC, es la Masa de Agua de la Corriente de California. MACT, es la Masa de Agua de California Transformada. MAEC, es la Masa de Agua Ecuatorial. COCC, es la Masa de Agua de la Contracorriente de California.	33

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla</u>		<u>Página</u>
I	Componentes principales de la matriz de variables conservadoras y no conservadoras.	27
II	Flujos de cadmio correspondientes al balance de masas. Las unidades están en Kg·d ⁻¹ . Las cifras en los paréntesis son porcentajes relativos de participación.	28
III	Modelo de regresión de cadmio vs las variables ambientales (componentes) en la zona fronteriza México-EUA. Junio, 1990.	36

VARIACION DE CADMIO EN ZONA DE SURGENCIAS DE LA COSTA NOROCCIDENTAL DE BAJA CALIFORNIA.

I. INTRODUCCION

Desde 1976 se ha tenido un avance significativo en la metodología analítica de los elementos traza en agua de mar. Por eso, actualmente contamos con un mayor conocimiento sobre las concentraciones y distribuciones oceánicas de los metales traza (Kremling y Hydes, 1988; Burton y Statham, 1990). Asimismo, esta metodología se ha aplicado con éxito en aguas costeras (Magnusson y Radmussen, 1984), las cuales presentan enriquecimientos considerables de metales, entre ellos el cadmio.

Una gran parte de la información oceanográfica sobre el cadmio se ha generado de perfiles verticales oceánicos del Pacífico Norte y Atlántico Norte (Boyle et al., 1976; Martin et al. 1976; Bruland et al., 1978; Bruland, 1980; Bruland y Franks, 1983; Yeats, 1988). La mayoría de los estudios muestran que el cadmio presenta una alta correlación con el fosfato y el nitrato (Boyle et al., 1976; Martin et al., 1976; Bruland, 1980; Knauer y Martin, 1981; Olafsson, 1983; Bruland y Franks, 1983; Danielson y Westerlund, 1983; Yeats y Campbell, 1983; Jones y Murray, 1984; Matsunaga y Abe, 1985; Sakamoto-Arnold et al., 1987). Esto sugiere una evidente afinidad del cadmio con el material biogénico particulado y que su distribución oceánica en la columna de agua está controlada por el reciclamiento de la materia orgánica (Bruland, 1980; Bruland y Franks, 1983). Mediante experimentos oceánicos con trampas de sedimentos se ha mostrado que las partículas biogénicas son un agente importante que controla la distribución vertical de metales en la columna de agua (Brewer et al., 1980; Baliétreri et al., 1981; Jickells et al., 1984; Noriki et al., 1985; Masuzawa et al., 1989; Noriki y Tsunogai, 1992). Además, mediante estudios recientes en mesocosmos se ha mostrado que la distribución de metales traza en la columna de agua es controlada biológicamente (Wangersky et al., 1989; Slauenwhite y Wangersky, 1991). La disminución aguda de la concentración del cadmio en aguas superficiales es sorprendente y se debe a una

eficiente remoción por partículas orgánicas. Sin embargo, generalmente se ha pensado que este metal no tiene una función biológica o requerimiento algal (Price y Morel, 1991; Bruland, 1992).

Los procesos que controlan la distribución del cadmio en la zona costera aún no están muy bien establecidos. El régimen costero presenta una mayor complejidad, debido a la influencia y combinación de los procesos físicos, químicos y biológicos en aguas superficiales, que generalmente son más intensos que en los regímenes oceánicos. En la zona costera se presenta un mayor aporte de nutrientes por procesos de mezcla y advección originados por surgencia, fenómenos asociados a mareas, ondas internas y efecto de isla. Además, existe resuspensión de sedimentos, se presenta una mayor productividad orgánica primaria, existen aportes terrígenos de sedimentos con metales y nutrientes, aportes atmosféricos de metales y la presencia de los aportes antropogénicos.

En particular, nuestra zona de estudio está sometida a la mayoría de los factores anteriormente enunciados. La única investigación realizada sobre metales frente a la costa de Baja California establece que el cadmio en aguas superficiales (0.5 m) está más asociado a procesos físicos (surgencia y advección) que a la influencia antropogénica (Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1991). Asimismo, Ortega Lara (1991) encontró un enriquecimiento de metales traza (Cd, Ag, Cr, Al y Mn) en los sedimentos superficiales de la región fronteriza México-EUA, con mayores concentraciones en la isóbata de los 60 m que en las estaciones adyacentes a la costa. Lares Reyes (1988) reportó que en Bahía San Quintín, B. C., la variación estacional del cadmio en *Mytilus californianus* presentó máximas concentraciones durante primavera-verano, cuando predomina el régimen de surgencia.

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar y explicar la distribución de la concentración de cadmio en una zona de surgencia costera adyacente a la frontera México-EUA y Punta Descanso, B. C. Se discute el origen del cadmio y los principales factores que influyen en su distribución. Se hace énfasis en el efecto de la variación de la biomasa fitoplanctónica, aportes de cadmio por surgencia y aportes

antropogénicos. Para satisfacer los objetivos de este trabajo se realizó un análisis hidrográfico, temperatura-salinidad (T-S) y un análisis multivariado por componentes principales. Para identificar las fuentes de cadmio se realizó un balance de masas, un análisis de los componentes que influyen en su distribución y la contribución relativa de los aportes dentro del área de estudio.

II. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende las aguas costeras de la región noroccidental de Baja California, entre $32^{\circ} 07' N$ y $32^{\circ} 36' N$ y $116^{\circ} 55' W$ y $117^{\circ} 38' W$ (Fig. 1). Geográficamente se extiende desde el sur de la costa de San Diego, California, hasta 50 km al sur de la línea fronteriza México-EUA, y hasta aproximadamente 50 km fuera de la costa. Esta zona se encuentra dentro de la sección sur de la región conocida oceanográficamente como la Ensenada del Sur de California (ESC) (Southern California Bight). De acuerdo con Mears (1973), la ESC se delimita al Este por la línea de costa desde Punta Concepción, California, hasta Punta Colonet, Baja California, y al Oeste por el Sistema de la Corriente de California (SCC).

Las corrientes en la ESC son complicadas e influenciadas por la topografía del fondo. Sin embargo, el patrón global de circulación de las aguas sigue al del SCC, con un transporte hacia el Sur de agua fría y de baja salinidad (Reid, 1963; Bernstein et al., 1977; Lynn et al., 1982) y además rica en nutrientes (Haury y Shulenberger, 1982). Frente a la costa de Baja California ($32^{\circ} N$) se presenta un giro que divide al SCC en dos (Dormany y Palmer, 1981): una que fluye hacia el Norte o Contracorriente de California (CC), y otra que fluye hacia el Sur a lo largo de la costa de Baja California. Sin embargo, de acuerdo a Lynn y Simpson (1987), al sur de la frontera México-EUA la mayor parte del año se presenta un flujo superficial costero hacia el Ecuador.

La costa del Sur de California se considera como una región de surgencia moderada (Roemmich, 1989). En la costa norte de Baja California, las surgencias se presentan durante la mayor parte del año, siendo más intensas en primavera y verano (Cota, 1971; Chávez de Ochoa, 1975; Bakun y Nelson, 1977; Amador Buenrostro, 1978; Barton y Argote, 1980; Torres Moye y Acosta Ruíz, 1986). En la costa de Baja California, los vientos son del noroeste con una fuerte componente hacia el Ecuador la mayor parte del año, con valores promedio máximos durante mayo y junio (Bakun, 1975; Pavía y Reyes, 1983). Esto genera surgencias durante casi todo el año, que son

más intensas en primavera y verano (Gómez Valdéz, 1983). Los eventos de surgencia se presentan con duración de 3 a 10 días (Amador Buenrostro, 1978) y provocan fuertes gradientes horizontales de temperatura y nutrientes en aguas costeras sobre la plataforma (Petersen et al., 1986).

Referente a la producción orgánica primaria, Hayward citado por Roemmich (1989) reportó que en las costas del sur de California es alta en relación a las aguas oceánicas del Pacífico Norte y además presenta una gran variabilidad estacional. La producción primaria es relativamente baja comparada con otras áreas de surgencias intensas (Eppley y Peterson, 1979).

La región costera presenta un clima mediterráneo con veranos secos y cálidos, e inviernos húmedos y fríos (Carlucci et al., 1986). El aporte de agua dulce por escurrimientos pluviales a la zona costera es escaso, siendo mayor la cantidad de flujo que proviene de las aguas residuales de las metrópolis de San Diego y Tijuana.

El volumen de agua residual descargado en nuestra área de estudio es de 226×10^6 galones día⁻¹. A San Diego corresponden 180×10^6 galones día⁻¹, descargados por el emisor submarino de Punta Loma a 20 km al norte de la frontera México-EUA (Department of Health Services, 1992). El resto corresponde a Tijuana, del cual 34×10^6 galones día⁻¹ son descargados al mar en Punta Bandera (Southern California Coastal Water Research Project, 1989) y 12×10^6 galones día⁻¹ son afluentes transportados por el Río Tijuana (Sánchez Rodríguez, 1990). Los desechos sólidos suspendidos que se descargaron por San Diego durante 1990 fueron de un promedio (anual) de 16,446 toneladas (SCCWRP, 1992), así como 1.16 toneladas de cadmio. Para la descarga municipal de Tijuana se reportan 6000 toneladas año⁻¹ de sólidos (SCCWRP, 1989b). Los sólidos suspendidos han sido asociados con los metales traza que ingresan a la zona costera (SCCWRP, 1987; Nishikawa et al., 1988).

III. METODOLOGIA

III. 1. Muestreo y análisis

Del 21 al 26 de junio de 1990, se realizó un crucero a bordo del buque oceanográfico "El Puma". El plan de crucero incluyó un total de 35 estaciones hidrográficas de las cuales ocho incluyeron muestreos para el análisis del cadmio (Fig. 1). Las estaciones hidrográficas se distribuyeron en transectos perpendiculares a la costa para estudiar el surgimiento de aguas subsuperficiales y su relación con el cadmio, en la plataforma y alrededor de las Islas Coronado. Las muestras de cadmio se obtuvieron de cuatro transectos perpendiculares y dos paralelos a la costa, con el fin de determinar los gradientes Norte-Sur y de la costa a mar abierto. Para el cadmio se muestrearon tres niveles. En todos los casos se muestreó a 10 m y dependiendo de la profundidad del fondo marino se decidió sobre los otros dos tratando de cubrir toda la columna de agua.

El muestreo hidrológico se realizó a los niveles estándares (0, 10, 20, 30, 50, 75, 100 y 200 m), dependiendo de la profundidad del fondo. Las variables fueron: oxígeno disuelto (OD), clorofila "a" (Cla), nitrato (NO_3) y fosfato (PO_4). El muestreo se realizó con botellas Niskin de 5.0 litros. Además, se utilizó un CTD, Neil Brown Mark V, para realizar mediciones de temperatura ($T^{\circ}\text{C}$) y salinidad (S ups). El viento fue medido por la estación meteorológica del buque. Se generó una serie de tiempo del 21 al 22 de junio en una estación fija localizada a 25 km de la costa y frente a la línea fronteriza México-EUA. En ésta, se midió el viento cada dos horas. Además, se realizaron registros meteorológicos en cada estación hidrográfica del plan de crucero anteriormente descrito.

El análisis de las variables hidrológicas fueron de acuerdo a métodos estándares. Las lecturas del CTD se calibraron y corrigieron con determinaciones discretas de salinidad y temperatura in situ. Estas se obtuvieron con un salinómetro de inducción y termómetros reversibles, respectivamente. Los nutrientes (NO_3 y PO_4) fueron analizados de acuerdo a la técnica espectrofotométrica descrita por Parsons et al.(1984),

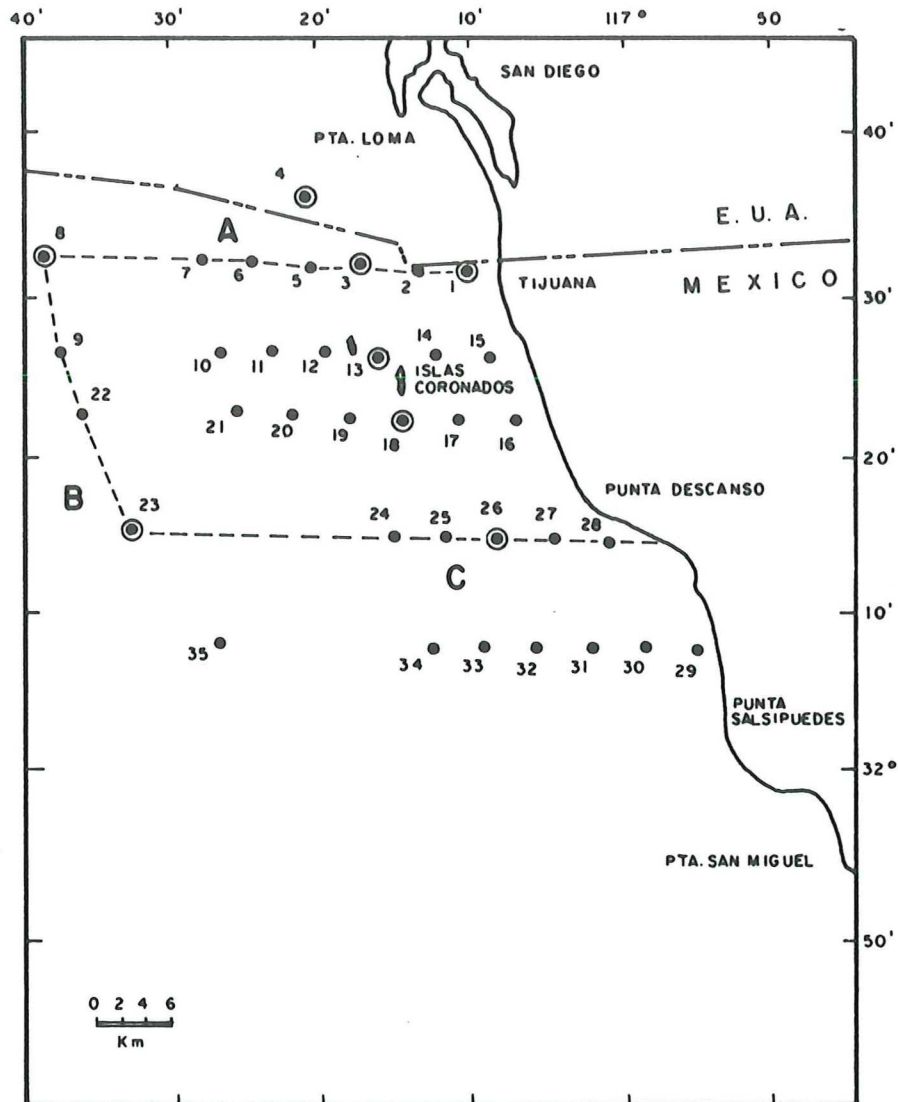


Figura 1. Localización del área de estudio y distribución de estaciones de muestreo. Estaciones donde se obtuvieron muestras de cadmio (●) y variables hidrológicas (•). Estaciones donde solamente se obtuvieron variables hidrológicas (•).

con un espectrofotómetro Spectronic 1001. El oxígeno disuelto se analizó por el método Winkler de acuerdo a Parsons et al. (1984). En relación a la clorofila *a*, las muestras fueron inmediatamente filtradas con filtros Gelman A/E (45 mm), se almacenaron en papel aluminio y se congelaron, permaneciendo así hasta antes de su análisis en el laboratorio de Ensenada. La clorofila se analizó de acuerdo al método de Holm-Hansen (1965) y se utilizó un fluorímetro Turner 112. Para el cálculo de las concentraciones se realizaron curvas de calibración con estándares de clorofila *a* ($r = 0.999$).^{*}

El muestreo, manejo y almacenamiento de muestras de cadmio se hizo de acuerdo con las técnicas descritas por Bruland et al. (1979) y Kremling (1983). Las muestras se tomaron con botellas GO-FLO (2.5 y 5.0 litros) con cubierta interna de teflón. Los muestreadores GO-FLO se bajaron en la proa del barco por medio de un malacate eléctrico con cable forrado de polivinilo. Las botellas se bajaban en posición cerrada, pero están diseñadas para que a la profundidad de 10 m la presión hidrostática libere una válvula que abre la botella y se llena de agua, misma que fluye libremente. Una vez que las botellas GO-FLO estaban a la profundidad deseada, se cerraban mediante un mensajero forrado de teflón (GO-Devil). Las botellas recuperadas se envolvían en bolsas de plástico, se conducían a un cuarto limpio (forrado de plástico y previamente lavado con HCl diluido) y se submuestreaban en botellas de polietileno de 1 l, bajo una campana de flujo laminar con presión positiva (Environment clase 100). Las muestras se preservaron con la adición de 1 ml de HNO₃ doblemente destilado, a un pH < 2. Se envolvieron en dos bolsas de plástico y éstas a su vez en una cubeta de plástico con tapa de presión (5 gal).

Al material y equipo utilizado para el muestro y análisis del cadmio se le aplicó un riguroso procedimiento de limpieza. Las botellas GO-FLO se limpiaron apegándose a la técnica descrita por Bruland et al. (1979): se lavaron con jabón micro (tres semanas), se enjuagaron con agua destilada desionizada (ADD), se llenaron con HCl (1 M) y se dejaron 10 días, luego se retiró el ácido y se enjuagaron (cinco veces); finalmente se llenaron con ADD, permaneciendo así en doble bolsa de plástico, hasta

antes de su utilización en el crucero. Para las botellas de almacenamiento y material de análisis, el procedimiento de limpieza fue muy similar: también fue lavado con jabón micro (tres semanas), luego se llenaron con HCL (6 M) y se introdujeron en recipientes conteniendo HCl (1 M), durante dos semanas. Se sacó el material, se retiró el ácido y se llenaron con HCl (3 M) para volver a ponerlos en el baño de HCl (1 M) otras dos semanas. Finalmente, se retiró el ácido, se enjuagó con ADD y se llenaron con HNO_3 0.1 % (doble destilado), se almacenaron en dos bolsas de plástico y se introdujeron en cubetas de plástico (5 gal) con tapa a presión. Todo el material para el análisis se secó a presión positiva (campanas Environment 100) y luego se almacenaron en dos bolsas de plástico con cierre hermético.

El análisis del cadmio se basó en la técnica de extracción orgánica descrita por Bruland et al. (1979). El fundamento del método consiste en la quelación del metal presente en la muestra de agua de mar, luego se realiza una doble extracción con un solvente orgánico y finalmente se extrae y concentra en un medio ácido. La medición se realizó por espectrofotometría de absorción atómica.

El análisis consistió en tomar aproximadamente 250 g de la muestra acidificada (sin filtrar) y depositarlos en un embudo de separación de teflón (250 ml), luego se amortigua con acetato de amonio (~2 ml) a un pH entre 4.0 y 4.5, se agrega 1 ml de los quelantes (APDC y DDDC) y 8 ml de cloroformo (HPLC) y se mezcla vigorosamente durante dos minutos. Después de cinco minutos de decantación se logra la separación de las fases, y en seguida la fracción de cloroformo se drena en embudo de separación de teflón (125 ml). Para una segunda extracción del metal, se agregan 5 ml de cloroformo a la muestra original, y después de la agitación-separación, el cloroformo se combina con la primera extracción (embudo de 125 ml). Luego se adicionan 100 μl de HNO_3 concentrado (ultralimpio) y se evaporan a sequedad durante toda la noche. Este último paso se repite tres veces, pero en un menor tiempo. Finalmente, la muestra concentrada se disuelve con 1 ml de HNO_3 ultralimpio y se transfiere a un vial de polipropileno. El vial se almacena refrigerado en doble bolsa de plástico.

La concentración del cadmio se determinó con un espectrofotómetro de absorción atómica (Perkin Elmer, Norwalk, CT) con horno de grafito (HGA - 500). Se utilizó la técnica de adición de estándares. Los testigos ($\bar{x} \pm 1$ D.S, $n=5$) para las extracciones orgánicas fueron de 1.5 ± 0.4 pmol kg⁻¹ y el límite de detección (2 veces D.S. de los testigos) fue 0.8 pmol kg⁻¹. Los resultados son equivalentes a la fracción disuelta más la fracción particulada del cadmio, por lo que la concentración se aproxima al cadmio total (Bruland et al., 1978).

III. 2. Procesamiento de los datos

III. 2. 1. Análisis Estadístico Multivariado

Debido a que el ecosistema costero estudiado es complejo y las variables disponibles son relativamente numerosas, se utilizó el análisis de componentes principales (ACP), para revelar la covariación biogeoquímica del cadmio. El ACP nos permite reducir el número de variables sin pérdida excesiva de la información y analizar en conjunto una gran cantidad de variables que posiblemente expliquen los principales mecanismos que afectan la distribución del cadmio. El análisis puede revelar la covariación de otro modo no aparente y puede dar una evaluación objetiva de la relación subjetiva (Mayzaud et al., 1984). Se describen situaciones complejas dejando que los factores o variables más importantes resalten del mismo análisis, el cual considera todas las variables estadísticas a cada nivel de medición (Begnini y Guileani, 1986).

El ACP se efectuó a partir de la matriz de correlación. Según Popham y D'Auria (1983), el uso de la matriz de correlación tiene la ventaja de que el efecto de las diferencias debidas a la magnitud se eliminan, por lo que a cada variable se le da la misma importancia relativa.

La terminología utilizada para este análisis fue la siguiente:

Componente, es una variable compuesta en que la relación entre las variables originales es única.

Carga, es el grado de correlación entre la variable original y su componente y se designa como α .

% de varianza común, es la cantidad de variabilidad explicada por el componente en el universo de datos.

Coefficiente de correlación, aquí se usa para indicar la relación entre los componentes y se designa como r .

En general, la composición de un componente se obtiene de la carga del mismo, donde una alta carga del componente significa que una gran cantidad de la información total es explicada por este componente. En términos cuantitativos, la carga da el porcentaje de la información total explicada por el componente. A los componentes se les denominó de acuerdo a la variable, o variables, con más alta carga y se asoció a un proceso representativo dentro del régimen hidrográfico bajo estudio.

Posteriormente se realizó un análisis de regresión múltiple (ARM), utilizando al cadmio como variable dependiente y a los componentes principales como variables independientes. El modelo ARM puede ser utilizado con propósitos predictivos. Sin embargo, para este trabajo sólo se utiliza con la finalidad de estimar cuantitativamente la contribución relativa de cada una de las nuevas variables para explicar la varianza del cadmio.

El análisis multivariado fue realizado con el programa SYSTAT 5.1 (Wilkinson, 1990). Se determinó un modelo estadístico multivariado, donde la variables analizadas fueron utilizadas en crudo o naturales; sólo se consideró las estaciones y cada nivel donde se tenían datos de cadmio.

III. 2. 2. Balance de masas

Se calculó un balance de masas para estimar la contribución relativa de los principales aportes y salidas de cadmio al área de estudio. Se consideró un prisma triangular sobre la plataforma en forma de cuña de 32 km de largo por 15 km de ancho y con una profundidad variando de cero, en la costa, a 60 m (Fig. 2). Geográficamente se extiende desde Punta Loma hasta Punta Descanso, y de la costa

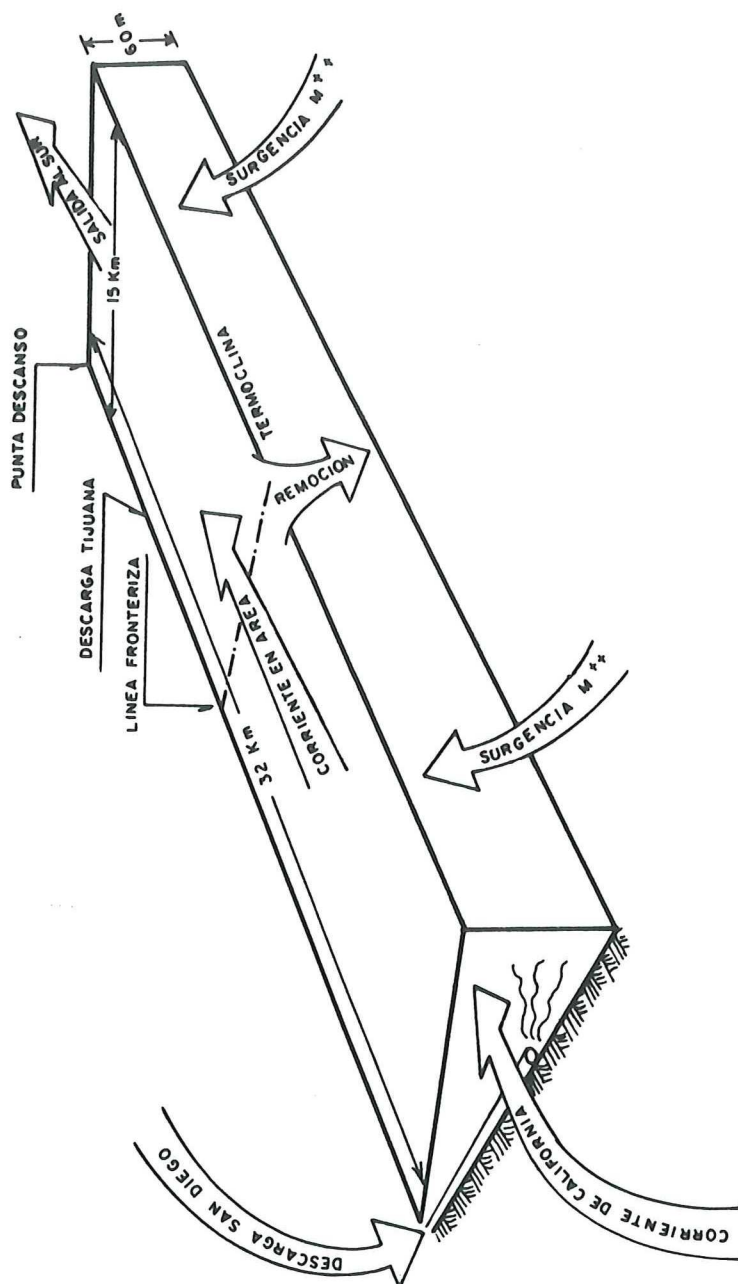


Figura 2. . Prisma triangular considerado para el balance de masas del cadmio.

hasta el borde de la plataforma continental. Por lo tanto, el volumen del prisma es de 14.4 km^3 . Para el balance de masas se consideró que el prisma opera como un tubo con aportes y salidas, por remoción dentro del sistema y además una salida de la masa del cadmio en la región sur.

Las entradas al sistema son la surgencia (C_sQ_s), la advección desde el norte ($C_{an}Q_{an}$) y la descarga antropogénica (C_dQ_d). Estas son balanceadas por la salida o advección al sur ($C_{as}Q_{as}$) y la remoción biológica ($(C_{r1}-C_{r3})Q_r$). Para el cálculo de la masa exportada al sur del prisma, se consideró la concentración de 0.116 nM y el tiempo de residencia en el prisma (4.58 días). Este se calculó a partir de la velocidad de la corriente en la zona (0.081 m s^{-1} ; Hendricks 1976). En relación a la remoción, se consideró que es biológica y que es representada por una diferencia de concentración de 0.046 nM entre las estaciones de la línea fronteriza (1 y 3). Esto representa una remoción por un flujo de partículas hacia mar abierto y hacia aguas más profundas. Para éste último, se supone que el flujo de estas partículas es por transporte de Ekman, el cual es similar al flujo de la surgencia. La ecuación considerada para el balance de masas fue:

$$C_s Q_s + C_{an} Q_{an} + C_d Q_d = C_{as} Q_{as} + (C_{r1} - C_{r3}) Q_r$$

$$ENTRADAS = SALIDAS$$

Donde C = Concentración y Q = Flujo. Los datos de entrada para la estimación fueron los siguientes:

Velocidad en la corriente de California = 0.1 m s^{-1} (NOAA, 1980).

Velocidad en el área de estudio (prisma) = 0.081 m s^{-1} (Hendricks, 1976).

Velocidad de la surgencia = 6 m d^{-1} (calculada en este estudio).

Concentración de cadmio en surgencia = 0.13 nM .

Concentración de cadmio en la C. California = 0.04 nM .

Concentración de cadmio en la estación 3 = 0.12 nM. = C_{r3} .

Concentración de cadmio en la estación 1 = 0.166 nM = C_{r1} .

Concentración de cadmio en el prisma = 0.166 nM.

Concentración de cadmio en emisor = 5 $\mu\text{g l}^{-1}$ (SCCWRP, 1990).

Concentración de cadmio en descarga de Tijuana = 17 $\mu\text{g l}^{-1}$
(comunicación personal, José de J. Meléndez Macías jefe de la planta de tratamiento de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana).

Gasto de agua en emisor = 722,933,000 l d^{-1} (SCCWRP, 1990).

Gasto de agua en descarga de Tijuana = 81,129,600 l d^{-1}
(Comunicación personal con jefe de la planta de tratamiento).

En la estimación del transporte del cadmio por surgencia se calculó la velocidad vertical en el área a partir de los datos de viento de los días previos y durante el desarrollo del crucero (Fig. 3). El viento dominante provino del noroeste y su velocidad promedio fue 6.5 m s^{-1} . Considerando que un viento uniforme del norte provoca un desplazamiento de agua hacia afuera de la costa producirá una surgencia costera dada por (Takano, 1955; Pond y Pickard, 1978):

$$W_o = T_y / \sqrt{g \Delta e H},$$

donde:

W_o = Velocidad de ascenso en m s^{-1} ,

T_y = Componente norte-sur del esfuerzo del viento,

$T_y = C * \rho * U^2$, donde:

C = Coeficiente de arrastre = 0.0013,

ρ = Densidad del aire = $0.00122 \text{ g cm}^{-3}$,

U = Velocidad promedio de la componente $U = 649 \text{ cm s}^{-1}$,

$T_y = 0.675 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$;

$g \Delta e$ Condición de ajuste cuasi-isostático = 2.5;

H = Espesor promedio de la capa de Ekman = 3836 cm

$$H = 4.3U / \sqrt{\text{sen } \phi}, \text{ donde:}$$

U = velocidad promedio de la componente u del viento = 649 cm s^{-1}

ϕ = latitud (32° N)

H = 3836 cm .

$W_o = 6.89 * 10^{-3} \text{ cm s}^{-1} = 5.95 \text{ m d}^{-1}$

III. 2. 3. Hidrografía

Para todas las variables medidas se construyeron transectos perpendiculares y paralelos a la costa, así como también en el plano horizontal a diferentes profundidades. La finalidad fue obtener la distribución horizontal y vertical de la hidrología para caracterizar gradientes en el área de estudio y, además de la descripción, vislumbrar la interacción de los procesos físicos, químicos y biológicos prevalecientes. La hidrografía, incluyendo la distribución de clorofila y nutrientes, nos ofrece el soporte oceanográfico para interpretar la distribución del cadmio. Además, se construyeron diagramas T-S para identificar las masas de agua presentes en la zona y así poder ubicar el origen del cadmio bajo el régimen oceanográfico prevaleciente. Las gráficas de distribución espacial se realizaron con el programa SYSTAT y los diagramas T-S con el programa SIGMA PLOT 5.0.

IV. RESULTADOS

IV. 1. Hidrografía

La temperatura superficial (10 metros) presentó un gradiente muy claro, con valores hasta 5 y 6 °C más bajos en la costa que hacia mar abierto (Fig. 3a). Se observaron dos lenguetas de agua fría (13 °C) de la costa hacia mar adentro: una frente a Punta Descanso y la otra al sur de la frontera México - EUA. Asimismo, una imagen de satélite tomada durante el crucero (24 de junio), reveló aguas frías en la costa (13 °C) y más calientes (19 °C) fuera de la costa (Fig. 4).

El intervalo de velocidad del viento, en el período previo y durante la realización del crucero, fue de 1 a 11 m s⁻¹, con dirección predominante noroeste y con velocidad promedio de 6.5 m s⁻¹. Durante dos días antes del muestreo, 21 y 22 de junio, el viento promedio en una estación fija, a 25 km de la costa mar adentro (línea fronteriza México-EUA) fue de 5.5 m s⁻¹. Los vientos se intensificaron durante el desarrollo del crucero en la sección sur del área de estudio (Fig. 3b).

Para facilitar la presentación de los resultados e identificar las principales características hidrográficas y procesos dominantes en el sentido vertical, se eligió el cubo formado por los transectos que limitan al área de estudio (Fig. 1 y 5). En la figura 5 el transecto A es el lado norte del cubo, el transecto B es el lado paralelo a la costa en la parte más profunda de la zona muestreada, el transecto C es el lado sur del cubo y, por supuesto, el lado de la costa no se muestra.

La distribución de temperatura mostró un levantamiento de las isotermas desde mar abierto (50 km) a la costa, con pendientes más intensas sobre el borde de la plataforma continental (Fig. 5a). En la parte sur del área de estudio, la isoterma de los 13 °C se elevó desde 60-70 m a 50 km de la costa hasta la superficie cerca de la costa (transecto C). En cambio, en la región norte sólo se elevó hasta 10 m de profundidad cerca de la costa (transecto A). En el transecto paralelo a la costa las isotermas fueron en general horizontales. En el transecto sur, la temperatura superficial

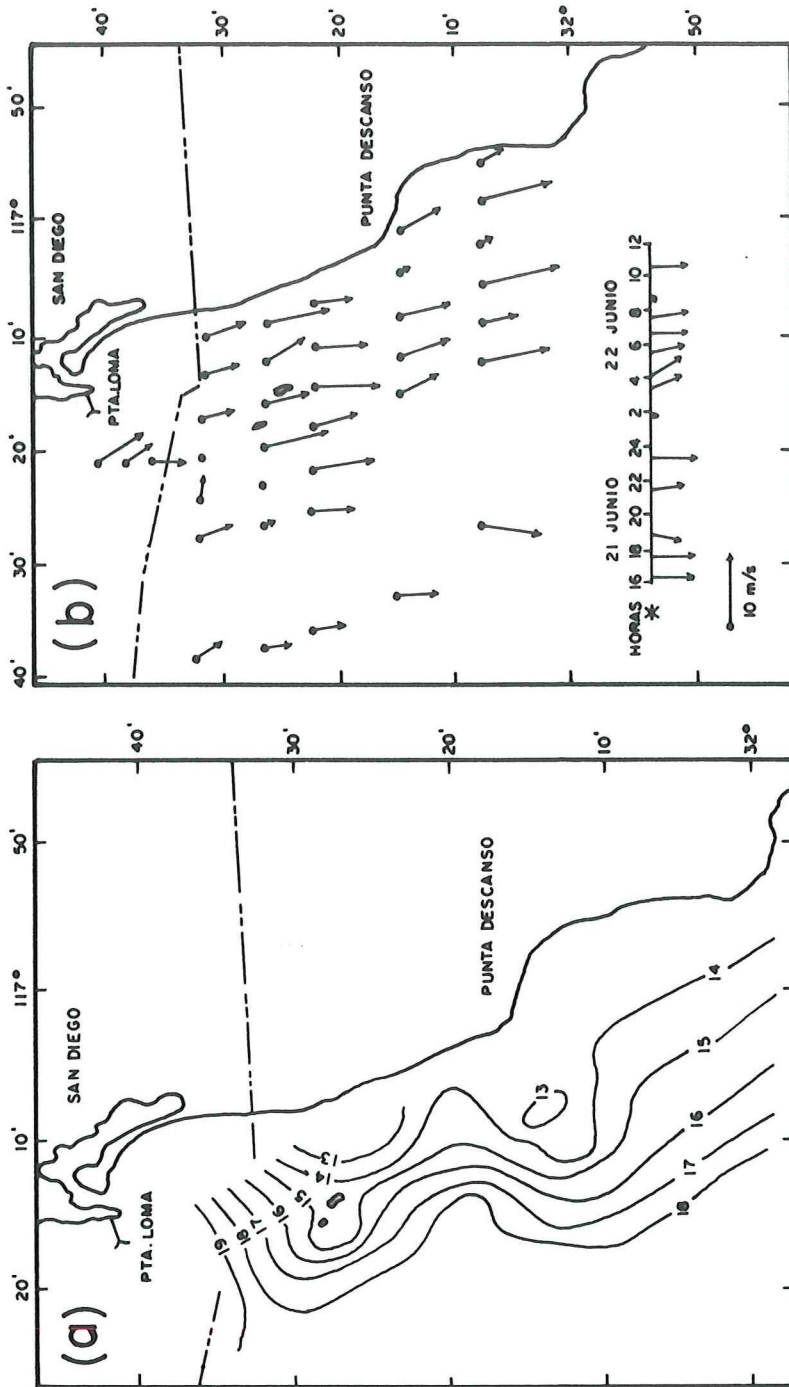


Figura 3. . Distribución horizontal de temperatura a 10 m de profundidad (a) y vientos medidos en el área de estudio (b).
 * Vientos medidos en la serie de tiempo donde se realizó el estudio de la variación diurna del 21 al 22 de Junio.

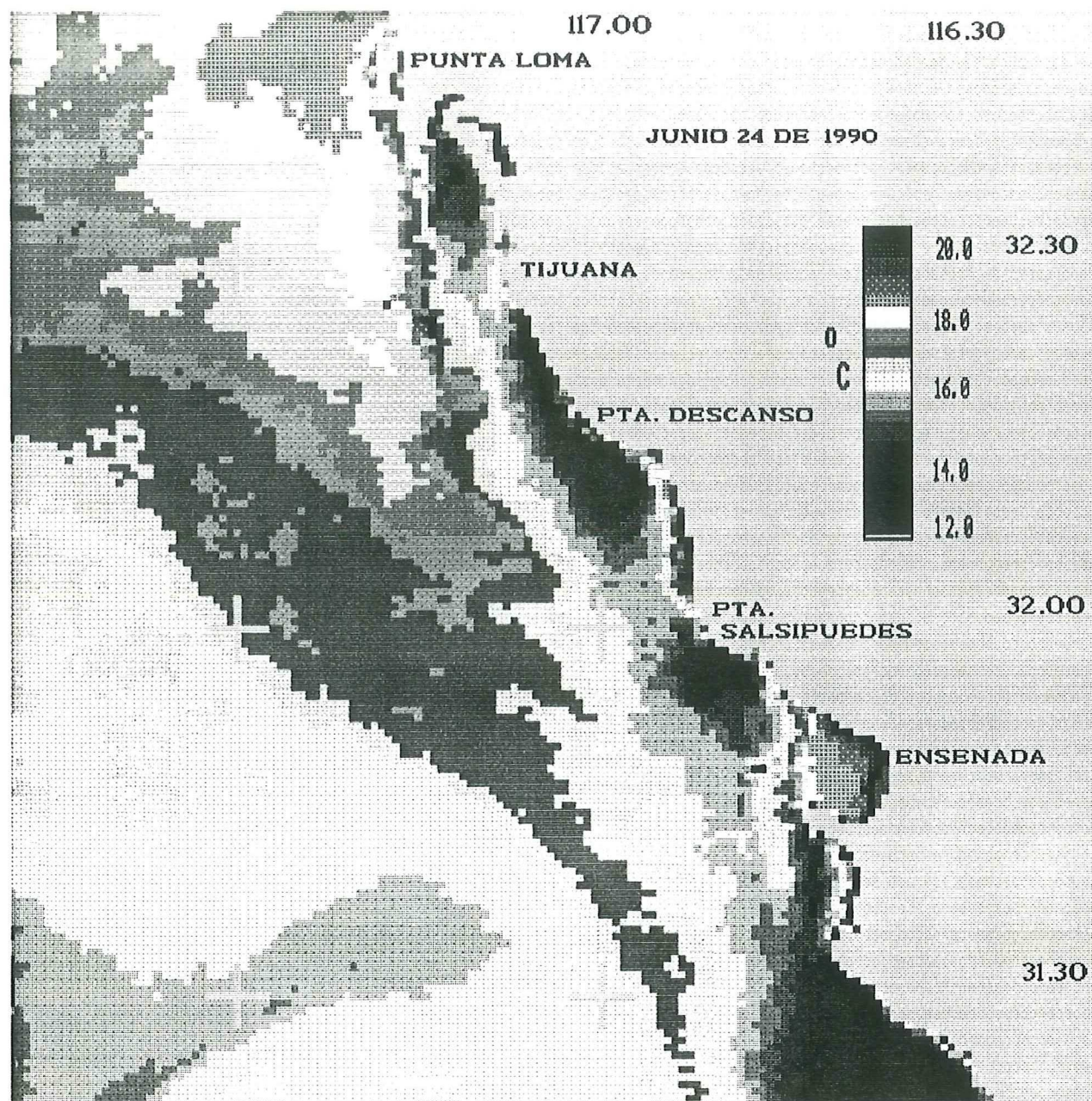


Figura 4 . . Imagen de satélite de infrarojo con temperatura superficial del 24 de Junio de 1990.

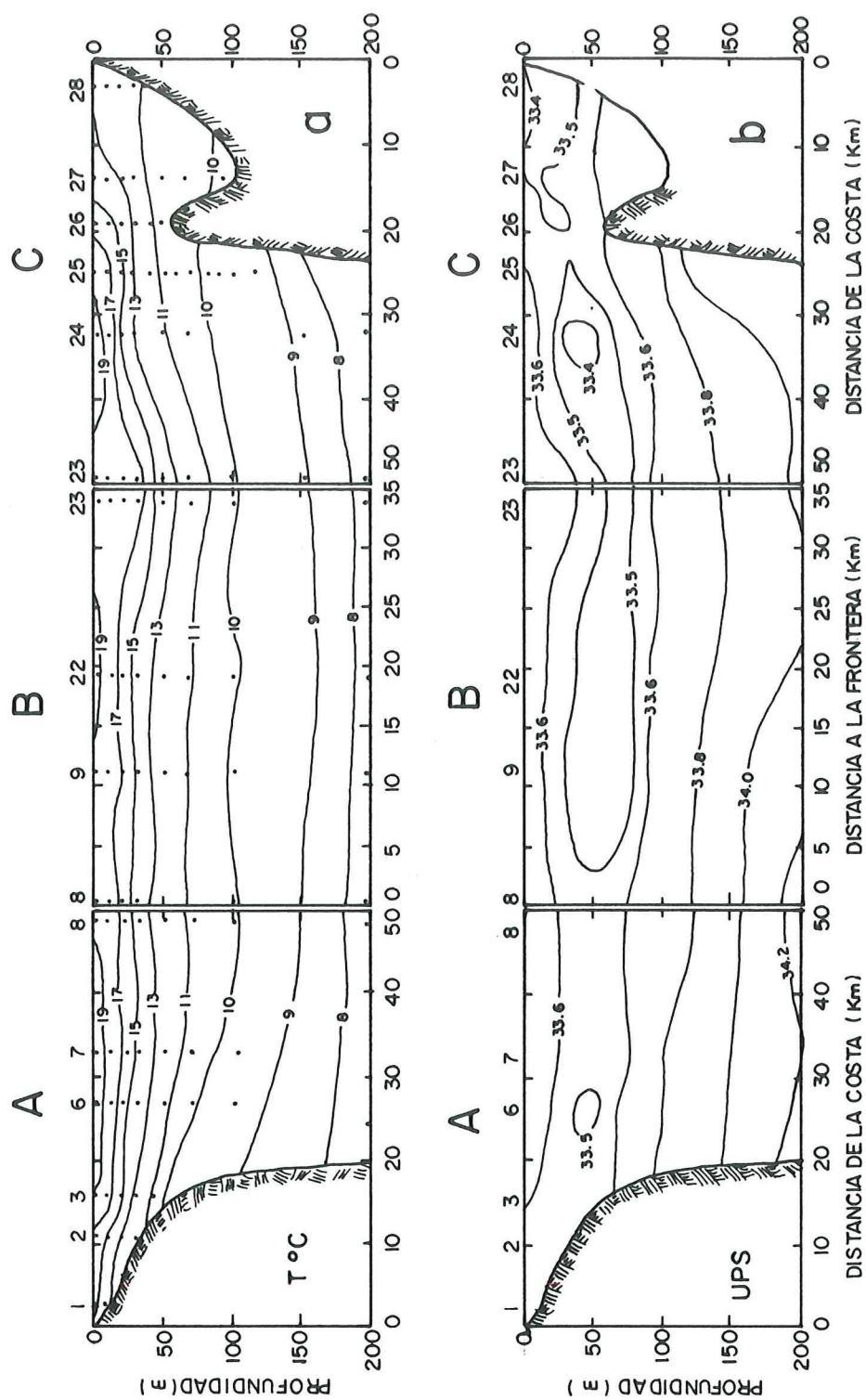


Figura 5. . Distribución vertical de temperatura (a) y salinidad (b).
A es el lado norte del cubo; B es el lado paralelo y a
50 km de la costa y C es el lado sur del cubo.

varió de menos de 13 °C cerca de la costa hasta más de 19 °C a 30 km de la costa. Cerca de la costa, en el transecto norte las temperaturas superficiales fueron hasta más de 2 °C mayores que en el transecto sur.

Las isohalinas también mostraron una elevación de mar abierto hacia la costa (Fig. 5b). La isohalina de 34.0 ups mostró este levantamiento de 200 m, a 40-50 km, a 100 m en el talud continental, a un poco más de 20 km de la costa. En la parte sur se detectó un núcleo con un mínimo subsuperficial de <33.4 ups, entre 30 y 40 km de la costa. Así como también un mínimo de salinidad (<33.4 ups) superficial costero (transecto C). La isohalina de 33.5 ups enmarca el mínimo subsuperficial de salinidad extendiéndose hasta la parte norte, donde sólo se manifiesta en una área pequeña en el transecto A, a unos 27 km de la costa y a 50 m de profundidad.

La distribución vertical de densidad presentó un comportamiento similar al de temperatura (Fig. 6a). Las pendientes fueron más pronunciadas sobre el talud y la plataforma. En la parte sur, la isopícnica de 25.0 sube desde 50 m de profundidad, a 50 km de la costa, hasta la superficie, a 15 km de la costa (transecto C). En la porción norte, esta isopícnica sólo sube a 10 m de profundidad en la costa (transecto A).

La distribución espacial de fósforo fue también similar a la de temperatura. Se presentó una pronunciada elevación de las isogramas de mar abierto hacia la zona costera (Fig. 6b). De nuevo, se aprecia una surgencia más intensa en la parte sur donde la isograma de 0.75 μM llegó a ser superficial cerca de la costa (transecto C) mientras que sólo alcanzó a elevarse a unos 20-30 m en la parte norte (transecto A). En esta parte norte, las aguas superficiales cercanas a la costa presentaron valores de fósforo de hasta 0.5 μM . A 50 m de profundidad, el fósforo alcanzó valores mayores a 1.0 μM sobre la plataforma y el borde del talud continental.

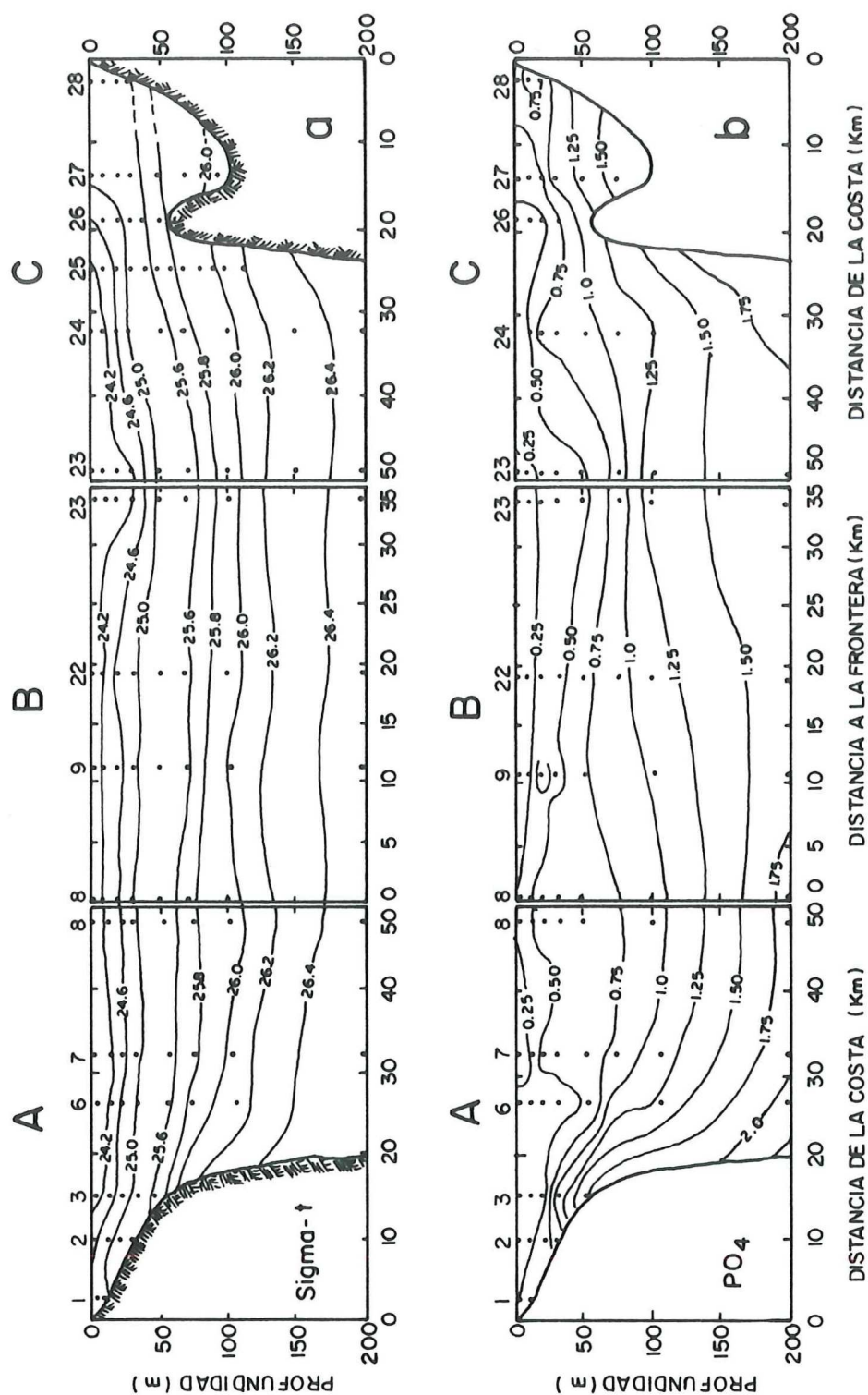


Figura 6. . Distribución vertical de densidad (a) y fosfatos (b).
 A es el lado norte del cubo; B es el lado paralelo y a
 50 km de la costa y C es el lado sur del cubo. El
 fósforo está en μM .

IV. 2. Cadmio

Las estaciones sobre la plataforma presentaron concentraciones de cadmio mayores que las estaciones de mar abierto (Fig. 7). Las más bajas concentraciones se localizaron en las estaciones más alejadas de la costa (0.03 - 0.058 nM), mientras que las máximas concentraciones se localizaron frente a la frontera México-EUA (0.166 nM) y frente a Punta Descanso (0.14 nM). El intervalo de concentración de cadmio medido en este estudio fue de 0.031 a 0.166 nM.

Con el objeto de estudiar la estructura vertical de la columna de agua sobre la plataforma, se generó un transecto con dirección norte-sur formado por las estaciones 3, 13, 18, 26 y 32 (Figs. 1 y 8). La distribución vertical de temperatura y de salinidad muestran la presencia de un frente (Fig. 8b y d). En la zona norte se encuentra la porción estratificada, mientras que al sur la parte mezclada. El frente se ubicó aproximadamente 25 km al sur de la frontera México-EUA y se caracterizó por la isoterma de 16 °C y la isohalina de 33.5 ups. Esta isohalina es representativa del mínimo de salinidad previamente descrito para esta zona. Asimismo, la distribución vertical de las variables no conservadoras, como la clorofila "a" y los nutrientes, se comportaron de una manera congruente con la presencia de este frente (Fig. 8c, e y f). En las aguas superficiales y subsuperficiales, en general, estas variables mostraron mayores concentraciones en la porción sur del transecto que en el norte. En la zona de mezcla se detectaron altas concentraciones de clorofila "a" (6 - 16 mg m⁻³) y en la zona estratificada la concentración fue considerablemente menor (1 mg m⁻³). El nitrato alcanzó valores superficiales de hasta 1.0 uM en el sur (fig. 8e).

De una manera similar a los nutrientes, la distribución vertical del cadmio mostró un comportamiento congruente con la presencia del frente (Fig. 8a). La zona de mezcla presentó valores de cadmio de hasta 0.14 nM, con los isogramas verticales casi hasta el fondo del mar, y con un gradiente horizontal muy claro con los valores disminuyendo hacia el norte. La zona estratificada presentó valores subsuperficiales relativamente altos, de hasta 0.12 nM, disminuyendo hacia el fondo hasta un mínimo (0.06 nM) a 20 m, para luego aumentar de nuevo con la profundidad.

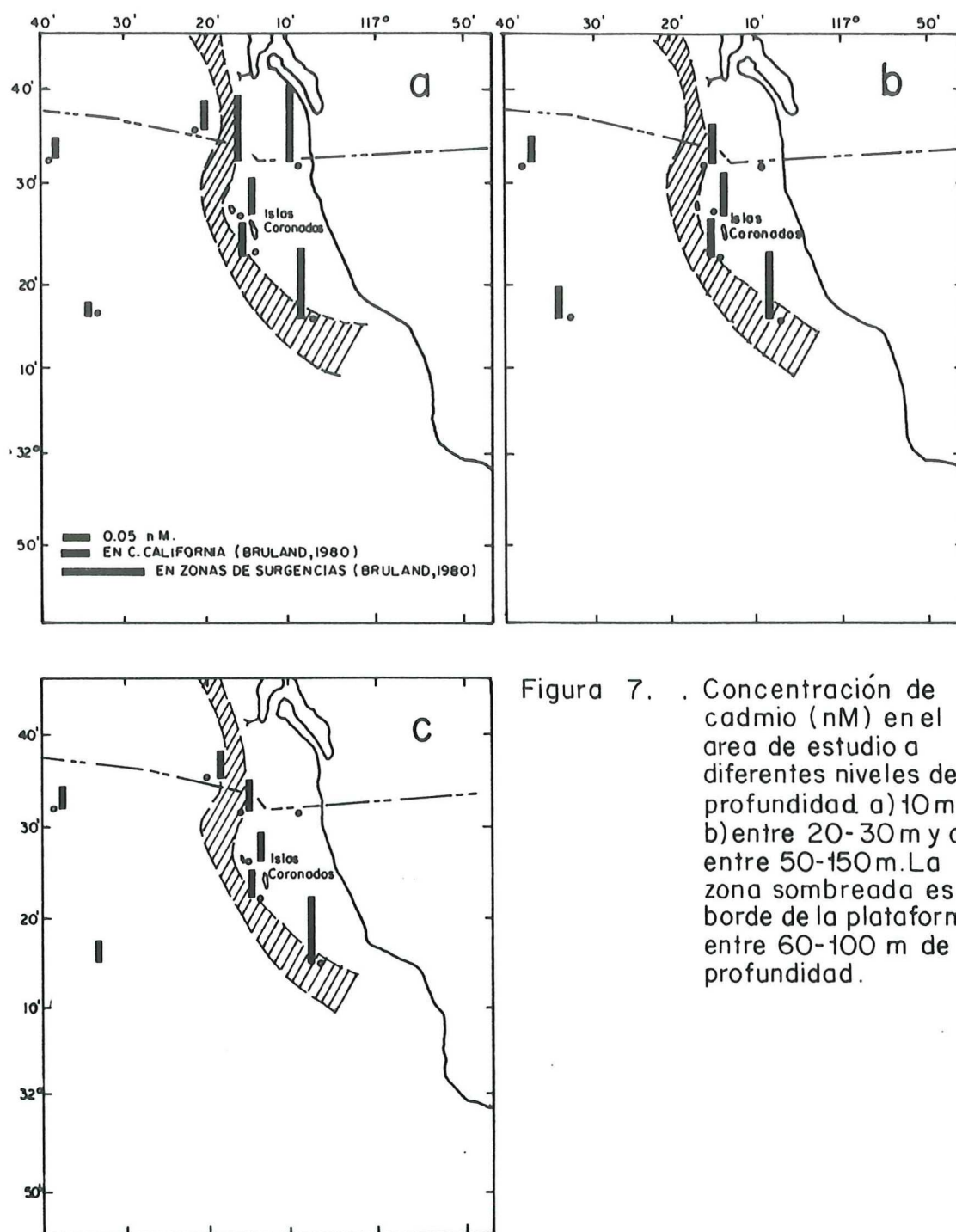


Figura 7. . Concentración de cadmio (nM) en el area de estudio a diferentes niveles de profundidad. a) 10m, b) entre 20-30m y c) entre 50-150m. La zona sombreada es el borde de la plataforma entre 60-100 m de profundidad.

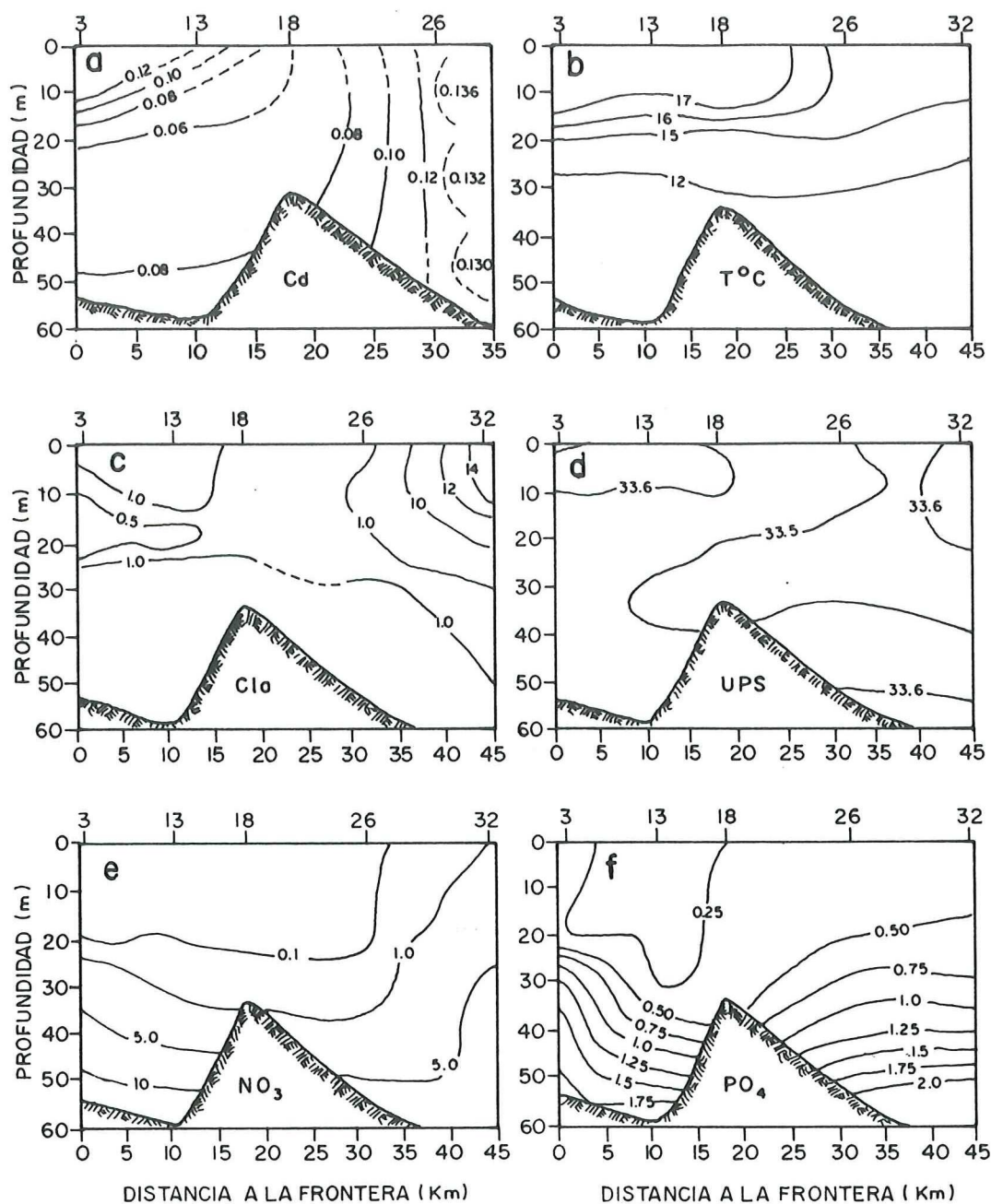


Figura 8. Distribución vertical al borde de la plataforma continental de cadmio (a), temperatura (b), clorofila (c), salinidad (d), nitrato (e) y fosfato (f). El transecto está orientado de norte a sur y a 15 km de la costa.

IV. 3. Análisis Multivariado

El análisis de agrupamiento (fig. 9) definió tres grupos: un grupo donde se asocian el cadmio y la clorofila "a", un segundo grupo donde se asocian los nutrientes y la densidad, y el tercer grupo donde se asocian el oxígeno con la temperatura y la salinidad. Entre éstos grupos se presenta un nivel de asociación, donde el grupo cadmio - clorofila está interrelacionado al aporte de nutrientes.

El análisis de componentes principales permitió distinguir cinco componentes o variables compuestas que explican aproximadamente un 94% de la varianza común del sistema (Tabla I). El 45% de la varianza común fue explicado por el primer componente (C1), el cual mostró las cargas mayores en oxígeno (-0.99), nitrato (0.85), fosfato (0.78), UAO (0.93) y temperatura (-0.50). El segundo componente, (C2), explicó el 10.2% de la varianza común y la salinidad fue la variable más importante de este componente. El tercer componente (C3) explicó el 13% de la varianza común y el fosfato fue su variable más importante. El cuarto componente (C4) explicó el 10% de la varianza común del sistema y la clorofila fue su variable más importante. Finalmente, el quinto componente (CP5) explicó el 15.6% de la varianza común y la densidad y la temperatura fueron sus variables más importantes.

IV. 4. Balance de masas

El 56.3% del cadmio (42.0 kg d^{-1}) fue aportado a la zona de estudio por la surgencia, un 23.4% (17.5 kg d^{-1}) por advección de la Corriente de California, un 6.6% (4.98 kg d^{-1}) por las descargas a la zona costera y un 13.5% (13.5 kg d^{-1}) son aportes de cadmio no identificados o fuera del alcance de la presente metodología (Tabla II). La remoción es un 20.0% (14.8 kg d^{-1}) y la salida al sur es 80.0% (59.74 kg d^{-1}).

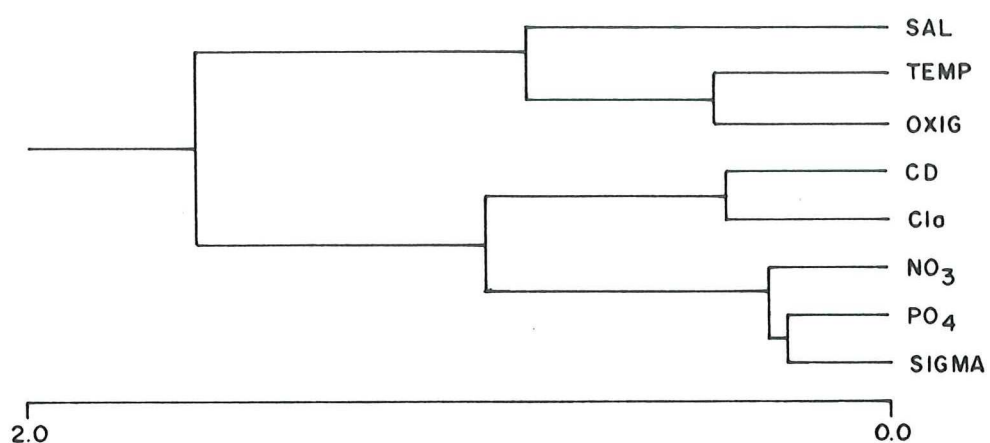


Figura 9. . Análisis de agrupamiento del cadmio con las variables conservadoras y no conservadoras .

Tabla I. Componentes principales de la matriz de variables conservadoras y no conservadoras .

VARIABLES	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
OXIG	-0.987 *	0.044	-0.018	0.072	-0.092
UAO	0.930 *	0.068	0.130	0.071	0.309
NO ₃	0.853 *	0.055	0.133	0.112	0.286
PO ₄	0.781 *	0.059	0.531 *	0.030	0.315
N:P	0.636 *	0.114	-0.106	0.190	0.265
SAL	0.003	-0.919 *	-0.014	-0.280	-0.271
Cl ₀	0.129	0.234 *	0.052	0.959 *	-0.020
SIGMA	0.481	0.293	0.249	-0.070	0.770 *
TEM	-0.496	-0.319 *	-0.239	-0.036	0.775 *
Var. Exp. (%)	45.03	10.17	12.90	9.72	15.59

Tabla II. Flujos de cadmio correspondientes al balance de masas. Las unidades están en $\text{Kg} \cdot \text{d}^{-1}$. Las cifras en los paréntesis son porcentajes relativos de participación.

ENTRADA				SALIDA	
SURGENCIA	ADVECCION	DESCARGA	?	ADVECCION AL SUR	REMOCION
42 (56.3 %)	17.5 (23.4 %)	4.98 (6.6 %)	10.11 (13.5 %)	59.74 (80.0 %)	14.8 (20.0 %)
$C_s Q_s$	$C_{on} Q_{on}$	$C_d Q_d$	$R_{es} + E_o$	$C_{os} Q_{os}$	$Q_r (C_{r1} - C_{r2})$

V. DISCUSION

Barber y Smith (1981) definieron al fenómeno de surgencia como el proceso en que agua subsuperficial es transportada hacia la superficie y advectada lejos del área del transporte vertical por un flujo superficial horizontal hacia afuera de la costa. Estas aguas son de menor temperatura, concentración de oxígeno, y de mayor densidad y contenido de nutrientes que las aguas superficiales de zonas mar adentro. En el área de estudio del presente trabajo, el gradiente con la temperatura superficial aumentando hacia afuera de la costa (Fig. 3a) evidencia un movimiento de agua hacia afuera de la costa, debido al transporte de Ekman inducido por el esfuerzo del viento. El factor principal que influye para que se desarrollen eventos de surgencia en la costa de Baja California es la presencia de vientos fuertes (8 m s^{-1}) con dirección predominante hacia el ecuador (Barton y Argote, 1980). Amador Buenrostro (1976, 1978) y García Córdova (1983) reportaron que el tiempo de respuesta del campo hidrográfico al efecto del viento (3 m s^{-1}) es de uno a dos días, cuando se provocan surgencias costeras en Punta Banda y Punta Colonet, Baja California. Los valores promedio de velocidad del viento del presente estudio fueron similares a los reportados para eventos de surgencia costera en estudios previos (González Morales y Gaxiola Castro 1991; Cervantes Duarte et al., 1993). Dorman y Palmer (1981) reportaron que durante verano las surgencias costeras entre La Jolla y Balboa, California, fueron provocadas por forzamientos de vientos locales de $2.8 - 3.87 \text{ m s}^{-1}$. Eventos similares de surgencia costera se han reportado a lo largo de la costa de California (Petersen et al., 1986). Lo antes expuesto permite afirmar que el viento y la fisiografía del área son los factores determinantes para el desarrollo de las lenguetas de agua fría que se proyectan de la costa hacia mar adentro.

En la distribución vertical de las variables hidrográficas, presentada en este trabajo, resalta la elevación hacia la costa de las isotermas y las isohalinas (Fig. 5) debido al transporte de Ekman por efecto del viento. Esta es una característica que revela claramente un surgimiento de agua subsuperficial. Gómez Valdez (1983) y

González Morales y Gaxiola Castro (1991) establecieron que en verano, a 100 km al sur de la frontera México-EUA, la elevación de las isotermas entre 12 y 14 °C, cerca de la costa, es un indicador de surgencia de aguas que provienen entre 100 y 85 m de profundidad. Ellos también indicaron que las isohalinas entre 33.6 y 33.8 ups muestran aguas que surgen de hasta 100 m de profundidad, lo cual es consistente con los resultados de la presente investigación.

Barton y Argote (1980) y Gómez Valdez (1983) investigaron la variabilidad de la estructura hidrográfica de verano en Punta Colonet (a 90 km al sur de Punta Banda) y Punta Banda, respectivamente; y establecieron que las isopícnas de 25.2 a 25.8 son trazadoras de un movimiento ascendente de aguas que provienen de niveles subsuperficiales (30 - 50 m). Asimismo, Cervantes Duarte et al. (1991) encontraron que las isopícnas entre 24.5 y 26.0 trazan surgencias frente a San Hipólito, B. C. S., en verano, y que surgen desde los 50 - 100 m de profundidad. En la presente investigación estos intervalos de densidad incluyen a la isopícnica de 25.0 que llega hasta la superficie y que proviene de profundidades similares (50 m) (Fig. 4a).

Se ha reportado que en las aguas frente a las costas del noroeste de Baja California el intervalo de fósforo de 0.75 a 1.50 μM es indicador de agua de surgencia (González Morales y Gaxiola Castro, 1991; Torres Moye y Acosta Ruiz, 1986). Los resultados de la presente investigación muestran que las concentraciones de 0.75 y 1.25 μM se ubicaron en mar abierto a profundidades entre 70 y más de 100 m, respectivamente, mientras que en la costa se observaron entre la superficie y 40 m de profundidad (trayecto C, Fig. 4b). Es evidente que las distribuciones verticales de temperatura, salinidad, densidad y fosforos son congruentes, y muestran que las aguas subsuperficiales presentaron una advección vertical por lo menos desde 200 m hacia profundidades menores, durante el período de estudio.

Con relación al mínimo subsuperficial de salinidad con núcleo a 40-50 m (Fig. 5b), Reid et al. (1958) y Reid (1973) establecieron que la Corriente de California presenta un mínimo de salinidad a 100 m de profundidad y su origen es de altas latitudes. Reid y Worrall (1964) reportaron que la Corriente de California vira al este

o hacia la costa, y el mínimo de salinidad sube hacia 30 ó 40 m de profundidad. Además, Dorman y Palmer (1981) reportaron para un área a 20 km al norte de la frontera México-EUA un comportamiento termohalino similar durante el verano, y asociaron agua fría superficial y un núcleo de baja salinidad (<33.53 ups) con agua que es advectada por la Corriente de California. Asimismo, el mínimo salino ha sido observado sobre la plataforma, justo al norte de San Diego (Tsuchiya, 1976). Este mínimo salino es el que se detecta a 50 km fuera de la costa (Fig. 5b, transecto B) y se eleva surgiendo en la zona costera.

Evidentemente, las características hidrográficas descritas, tanto en el plano vertical como horizontal, revelan una surgencia costera con advección vertical subsuperficial y transporte hacia afuera de la costa. De acuerdo con Gómez Valdez (1982), el fenómeno se debe a una combinación del balance geostrófico en el flujo de la Corriente de California y la deriva de Ekman causada por el esfuerzo del viento. En el hemisferio norte, con el balance geostrófico el agua fría, de mayor densidad, se eleva al lado izquierdo del flujo de la corriente (Newman y Pearson, 1966). De acuerdo a Sverdrup et al. (1942), las surgencias son más intensas frente a puntas y cabos que se proyectan en la corriente. Esto es congruente con la mayor evidencia de surgencia en Punta Descanso por el levantamiento de la isoterma de 13°C hasta la superficie. Mancilla Peraza et al. (1993) reportaron un efecto similar en Punta Canoas al norte de Bahía Vizcaíno, B. C. S.

En la Cuenca del Sur de California, durante el verano se registran disminuciones drásticas de temperatura superficial que se atribuyen a ondas internas predecibles dentro del ciclo lunar, las que provocan advección de agua fría a la superficie (Pineda, 1991). Este factor posiblemente influya en la mezcla y disminución de la temperatura superficial del área del presente estudio, ya que coincidió con luna nueva.

Las masas de agua presentes en el área de estudio se identificaron mediante diagramas T-S y de acuerdo a los criterios de Kin'dyushev (1970). Las masas identificables fueron tres. La Masa de Agua de la Corriente de California (MACC), con temperaturas entre 10 y 18.5°C , salinidad entre 33.35 y 33.6 ups y sigma-t

entre 24.0 y 26.0 (Fig. 10). Esta agua se identifica por arriba de los primeros 100 m de profundidad (Figs. 5 y 6). Es necesario resaltar que el agua por encima del criterio de Kin'dyushev (1970), con salinidad entre 33.5 a 33.6 ups, sigma-t mayor a 25.0 y temperaturas mayores a 15 °C es también agua superficial de la Corriente de California sobre la plataforma y la termoclina, la cual fue advectada hacia afuera de la costa. La segunda es la Masa de Agua Ecuatorial (MAEC) o Contracorriente de California (COCC), con temperatura entre 8 y 10 °C, salinidad entre 33.98 y 34.35 ups, y sigma-t entre 26.4 y 26.6 (Fig. 10). Esta agua se ubica de 150 - 175 m de profundidad hacia abajo (Figs. 5 y 6). La tercera masa de agua, es la Masa de Agua de California Transformada (MACT), producto de la mezcla entre la MACC y MAEC; sus temperaturas son de 8 a 10 °C, salinidad de 33.6 a 34.2 ups y sigma-t entre 26.0 y 26.4 (Fig. 9) y se ubica de 100 a 150 m de profundidad (Figs. 5 y 6). En general, la mayoría de los registros (95%) corresponden a la MACC (65%) y MACT (30%) y un mínimo de la MAEC (5%).

En el contexto global del Sistema de la Corriente de California, Lynn et al. (1982) estableció que la MACC es superficial (0-300 m), con flujo permanente al ecuador y su núcleo se caracteriza por presentar agua con baja temperatura, baja salinidad y alto contenido de oxígeno. Sin embargo, Simpson (1984) la ubicó de 0 a 200 m de profundidad. El mínimo de salinidad de la MACC está ubicado a 100 m de profundidad (Reid et al., 1958) y cuando la Corriente de California gira hacia la costa, el mínimo (33.35 ups) es advectado a niveles someros (40-60 m), tal como lo han reportado Reid y Worrall (1964) y Tsuchiya (1976) para la zona frente a la costa del Sur de California. El mínimo de salinidad (<33.5 ups) en el presente estudio se presentó a profundidades subsuperficiales de 40 a 50 m.

En contraste, investigaciones en la Cuenca del Sur de California (Simpson, 1984; Lynn y Simpson, 1987) han ubicado a la MAEC cerca de la pendiente continental. Esta masa de agua fluye hacia el norte entre 200 y 500 m de profundidad. Wooster y Jones (1970) identificaron un núcleo de alta velocidad a lo largo del talud continental, con máximos valores de salinidad > 34.3 ups, temperatura entre 8 y 11 °C y centrado

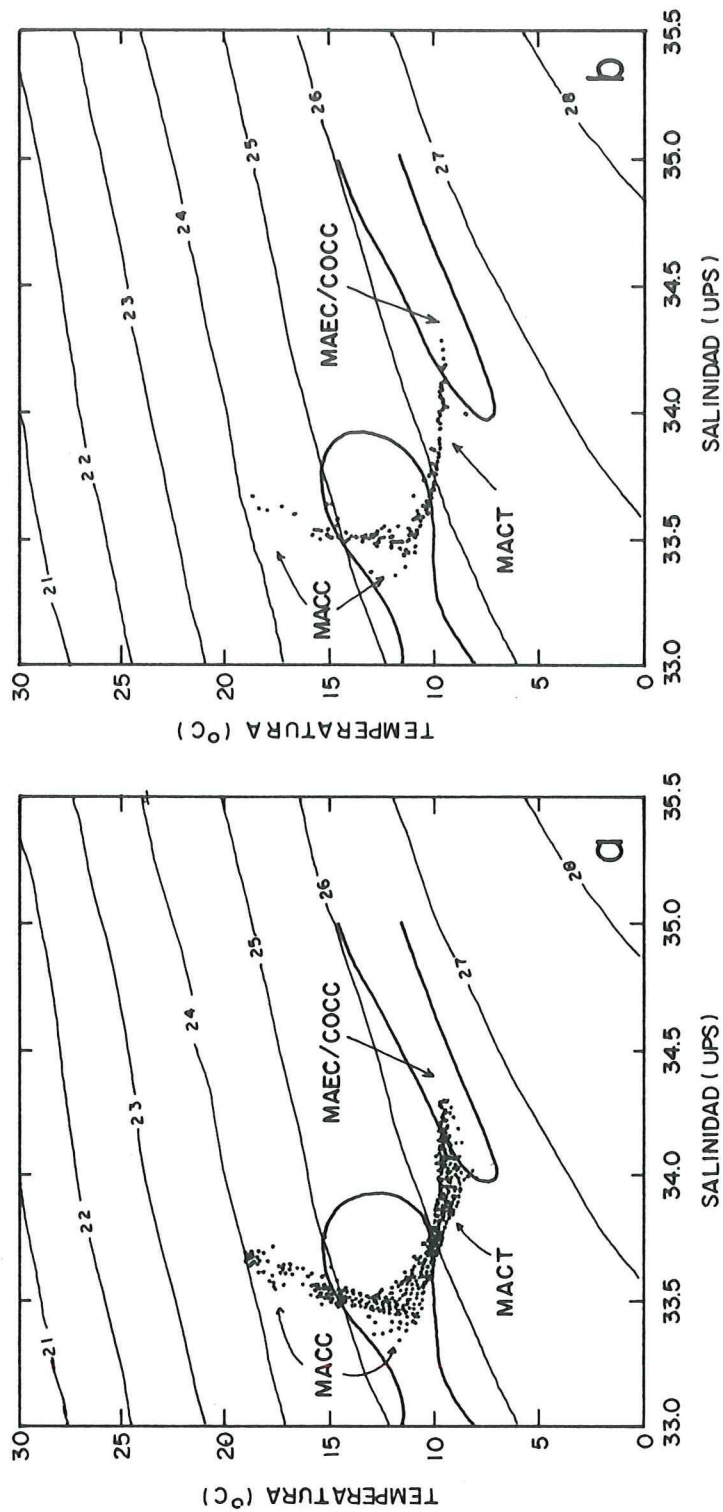


Figura 10. . Diagramas T-S. a) en toda el área de estudio y b) solamente en la zona de surgencia. Las masas de agua se identifican de acuerdo a Kin'dyushev (1970) donde: MACC, es la Masa de agua de la Corriente de California MACT, es la Masa de Agua de California Transformada MAEC, es la Masa de Agua Ecuatorial COCC, es la Masa de Agua de la Contracorriente de California.

a una sigma-t de 26.54. Hickey (1979) también reportó características de temperatura y salinidad del núcleo frente a Baja California y fueron 9.5 °C y 34.6 ups, respectivamente. Todas estas características en general coinciden con los resultados de la presente investigación que ubican a la MAEC por debajo de los 200 m (230 - 250 m). Asimismo, utilizando fósforo total y preformado, Torres-Moye y Acosta-Ruiz (1986) identificaron (en verano) a la Contracorriente de California, ubicándola por debajo de 150 m en una área cercana a Punta Colonet, Baja California. Las características hidrográficas y los diagramas T-S indican la presencia de una surgencia costera con afloramiento de agua de la Corriente de California y una mínima influencia de la Contracorriente de California, en el período del presente estudio.

Los valores de concentración de cadmio del presente estudio se encuentran dentro del intervalo reportado para aguas de la Corriente de California (Bruland, 1980), surgencias en la Cuenca del Sur de California (Bruland, 1980) y aguas costeras de Baja California (Sañudo-Wilhelmy y Flegal, 1991). Esto corrobora que las concentraciones de cadmio registradas durante el presente estudio están dentro del intervalo natural de concentraciones características de las aguas de la Ensenada del Sur de California.

Evidentemente, el gradiente observado con valores mayores de cadmio sobre las estaciones de la plataforma y menores en mar abierto, indican una fuente de enriquecimiento (fig. 7). Por ejemplo, los valores de cadmio en las estaciones fronterizas (1 y 3) y la de Punta Descanso (26) fueron un orden de magnitud mayor que las de mar abierto (8 y 23). Si consideramos la concentración de cadmio menor (0.03 nM) de la estación de mar abierto (23) y la comparamos con las estaciones de la plataforma, podemos ver que se presentaron factores de enriquecimiento hasta de 5.5. Los más altos enriquecimientos se presentan en la frontera (5.5) y Punta Descanso (>4.3). Varios estudios han dado evidencias del enriquecimiento relativo de elementos traza en aguas costeras (Boyle et al., 1981; Bruland y Franks, 1983). En comparación con las aguas oceánicas, en las aguas costeras los factores de enriquecimiento son de 3 a 5 para el manganeso, cadmio, aluminio y cobre, para la plataforma europea

(Kremling, 1985). Boyle et al. (1976) han reportado que en aguas superficiales el cadmio, al igual que el fosfato, es enriquecido en regiones de surgencias en relación a áreas de baja productividad. Bruland et al. (1980) reportaron altas concentraciones de cadmio en agua superficial enriquecida con nutrientes. Para el presente estudio, el cadmio es enriquecido en aguas costeras superficiales, al igual que el fosfato (Fig. 6b). Las concentraciones de fosfato en las estaciones de la plataforma (0.75 μM) presentaron un factor de enriquecimiento con relación a las estaciones fuera de la costa (0.25 μM) de tres, que está dentro del intervalo presentado por el cadmio (1 - 5.5). Martin y Broenkow (1975) observaron enriquecimientos de cadmio en plancton por un factor de tres en la zona de surgencia de Baja California con relación a organismos mar adentro. Los resultados del presente estudio sugieren que uno de los procesos que influyen sobre el enriquecimiento del cadmio y fosfato en las estaciones de la plataforma es la surgencia costera.

Debido a la consistencia del comportamiento de la concentración del cadmio con las variables conservadoras y no conservadoras, se sugiere que la distribución del cadmio está controlada por procesos físicos y biológicos como son la surgencia y la fotosíntesis.

La covariación del cadmio con las variables conservadoras y no conservadoras, se presenta con el análisis de agrupamiento (Fig. 9) y el análisis de componentes principales (ACP) (Tabla I), mediante los cuales se distingue importante información biogeoquímica del cadmio. En el ACP no se consideró el cadmio como una de las variables, debido a que este análisis fue una herramienta analítica o paso intermedio para eliminar problemas de colinealidad de variables y así poder generar nuevas variables independientes o componentes (interpretados como procesos) que por medio del modelo de regresión expliquen la varianza del cadmio bajo el sistema hidrográfico prevaleciente.

En general, ambos análisis multivariados muestran resultados similares y consistentes al régimen hidrográfico descrito. El análisis de agrupamiento permite distinguir una covariación del cadmio con las variables conservadoras y no

conservadoras, explicitando que su biogeoquímica se asocia a la biomasa fitoplanctónica y a los nutrientes. Por ejemplo, en el ACP el C1 es debido al régimen de surgencia de aguas con alto contenido de nutrientes, con bajo oxígeno y baja temperatura. El C2 puede asociarse a un régimen de mezcla costera y se identifica por la baja temperatura, baja salinidad y la presencia de clorofila. El C3 está asociado al aporte de fosfato en el área. El C4 se asocia con la presencia de partículas biogénicas que florecen después de un evento de surgencia costera. Hemingway (1979) reportó una descripción del ecosistema de la Corriente de California y reveló, por medio de un análisis de factores, que la mayor parte de la varianza del ecosistema pudo ser explicada por el surgimiento de nutrientes (36%), por mezcla (18%) y por la producción primaria (7.3%), lo cual está de acuerdo con los resultados de este estudio. Los resultados descritos sugieren que el ecosistema costero del noroeste de Baja California está regido por los componentes principales arriba mencionados y que la distribución del cadmio debe estar influenciado por alguno(s) de éstos factores.

El modelo de regresión tomando a la concentración del cadmio como variable dependiente explicó el 60% de su varianza. La biomasa fitoplanctónica y el fosfato fueron los principales predictores que explicaron la distribución del metal (Tabla III). Este resultado es consistente con el régimen hidrográfico descrito: un proceso donde se presenta el enriquecimiento de nutrientes y una fuerte actividad fotosintética.

Tabla III. Modelo de regresión del cadmio vs variables ambientales (componentes) en la zona fronteriza México - EUA durante junio de 1990. n = # de datos, R^2 = coeficiente de determinación.

M O D E L O	n	R^2	P
$Cd = 13.489 + 4.243 \text{ CP4} + 2.31 \text{ CP3}$	20	0.60	0.001

CP3 = Fosfatos

CP4 = Biomasa fitoplanctónica

Boyle (1988) y Martin y Gordon (1988) establecieron que elementos como el cadmio, zinc y hierro presentan una distribución controlada por su involucramiento

en uno o más ciclos biogeoquímicos que operan en el océano. Los resultados de la presente investigación demuestran que la distribución del cadmio puede ser explicada por la biomasa fitoplanctónica y el aporte de nutrientes. Por lo tanto, la clorofila "a" es considerada como una medida relativa de las partículas biogénicas que se presentan después de la surgencia. Slauenwhite y Wangensky (1991) investigaron en mesocosmos el efecto de la productividad sobre la concentración del cadmio; y este presentó una gran disminución en el pico del florecimiento de la productividad, atribuida a la remoción de la fase disuelta por la fase particulada, la que posteriormente se hundió por debajo de la capa superficial. Además, el flujo de cadmio mostró un gran incremento después del colapso del florecimiento con la subsecuente coagulación de las partículas. Lo anterior es congruente con los resultados del presente estudio, ya que se presenta un aporte de nutrientes por surgencia, un período de acondicionamiento y un florecimiento donde el cadmio disuelto es asociado a las partículas biogénicas. Noriki et al. (1985) reportaron que en la Bahía de Funka, Japón, los flujos de cadmio particulado hacia el fondo fueron varias veces mayores después del florecimiento, y los niveles de cadmio fueron más altos en partículas biogénicas que en las no biogénicas.

En relación a la asociación del cadmio con los nutrientes (fosfato), se debe a que ambos elementos son aportados por la surgencia, tal como lo demuestra la hidrografía, análisis estadístico y sus factores de enriquecimiento. Las investigaciones de Boyle et al. (1976), Martin et al. (1976), Bruland (1980) y Bruland y Franks (1983) demuestran que existe una correlación del cadmio con el material biogénico particulado y que su distribución en la columna de agua es controlada por el reciclamiento de la materia orgánica. En otras palabras, la concentración del cadmio está directamente relacionada a la actividad biológica y a la captación - regeneración de nutrientes (Yeast, 1988). Por lo tanto, para la presente investigación se infiere que la concentración - distribución del cadmio es influenciada por un balance entre el aporte por surgencia y el consumo por la actividad fitoplanctónica.

En la mayoría de los metales, las velocidades de sus ciclos internos son tan rápidos que no es posible medir el grado con el cual las distribuciones reflejan la influencia antropogénica (Yeasts y Brewers, 1983). Por lo tanto, en la zona costera es difícil discriminar las entradas antropogénicas de las naturales con sólo tener la concentración del metal en el agua (Balls, 1989). Una alternativa indirecta para cuantificar e identificar los aportes relativos del metal a la zona costera es mediante la realización de un balance de masas.

De acuerdo a los resultados hidrográficos y estadísticos del presente trabajo, el cadmio se asoció a la surgencia, partículas biogénicas y a la advección por la Corriente de California. También es conocido el aporte de cadmio a la zona costera por las descargas de aguas residuales de San Diego y Tijuana. Como primera aproximación, estas fuentes y características se consideraron para la realización de un balance de masas del cadmio. Los resultados sugieren que la principal fuente de cadmio al área de estudio fue la surgencia, en segundo término la advección horizontal y en un menor grado los aportes antropogénicos. Sin embargo, si comparamos los aportes antropogénicos (5 kg d^{-1}) con los aportes naturales por surgencia (42.0 kg d^{-1}) y por advección de la Corriente de California (17.5 kg d^{-1}), los aportes de cadmio por descargas representan el 12 y 28.5%, respectivamente. Otra comparación que nos da una idea más objetiva de la magnitud del aporte antropogénico, es con el aporte por advección de la Corriente de California cuando ésta tiene su menor velocidad de corriente (0.04 m s^{-1}) (Lynn y Simpson, 1987), se estima una carga en cadmio de 7.0 kg d^{-1} . Esta carga es de una magnitud muy similar a las descargas antropogénicas en el área de estudio. Lo anterior indica que en ciertos períodos la descarga antropogénica llega casi a igualar los aportes naturales por advección de la Corriente de California.

En general, el balance de masas sólo explica el 86.4% de los aportes de cadmio. El 13.5% no explicado (10.11 kg d^{-1}) puede ser por resuspensión en la plataforma y por entrada vía atmósfera. Bruland (1980) reportó que la entrada atmosférica de cadmio para el Pacífico es de $0.018 \text{ nM cm}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Considerando este

dato, la entrada vía atmósfera a la zona de estudio sería de 0.024 kg d^{-1} lo que es despreciable. Por lo tanto, la mayoría del cadmio no explicado por el cálculo de balance de masas sería por la resuspensión en la plataforma. Ortega Lara (1991) reportó un factor de enriquecimiento de cadmio de 14 en los sedimentos superficiales de la región fronteriza, con mayores concentraciones en la isobata de los 60 metros que en las estaciones adyacentes a la costa; además el cadmio fue asociado al material orgánico en el sedimento.

La remoción es de la misma magnitud que el aporte por advección. Si se supone un estado estacionario, en la zona de estudio debe existir un mecanismo que equilibre las entradas y salidas del cadmio y prevalezcan los gradientes entre la costa y mar adentro. En otras palabras, al existir los aportes por surgencia, advección y descargas, estos se movilizan perpendicular y paralelamente a la costa. Si los gradientes de cadmio prevalecen, sugieren que en esas direcciones se presenta un fenómeno que remueve al cadmio del sistema y se va al fondo u horizontalmente hacia zonas adyacentes. En la zona de estudio, principalmente en la zona costera, se observó un florecimiento que se evidenció por las altas concentraciones de clorofila "a", la cual fue asociada para explicar la distribución del cadmio. Slauenwhite y Wangersky (1991) y Noriky et al. (1985) reportaron una gran remoción de la fase disuelta por la fase particulada, y que después de los florecimientos los niveles de cadmio fueron más altos en las partículas biogénicas que en las no biogénicas y que decaen en las capas superficiales. Para la presente área de estudio, Ortega-Lara (1991) señaló que los sedimentos de la zona fronteriza se encuentran enriquecidos 14 veces con cadmio, mismo que se asoció a la materia orgánica del sedimento. Lo anterior sustenta la remoción planteada para el balance de masas del cadmio del presente estudio.

VI. CONCLUSIONES

Las características hidrográficas revelaron una surgencia costera con advección vertical subsuperficial y transporte hacia afuera de la costa. El agua aflorada es de la Corriente de California con mínima influencia de la Contra Corriente de California. Se presentaron dos lenguetas de agua fría (13°C) de la costa hacia mar adentro: una frente a Punta Descanso y la otra al sur de la frontera México - EUA.

Las concentraciones de cadmio registradas están dentro del intervalo natural de concentraciones características de las aguas de la Ensenada del Sur de California.

Sobre la plataforma se presentaron factores de enriquecimiento del cadmio que fueron hasta de 5.5 veces con relación a las concentraciones de mar abierto.

Los análisis hidrográfico y estadístico sugieren que la distribución del cadmio se explica por procesos físicos y biológicos. El proceso físico dominante es la surgencia y el biológico es la actividad fitoplanctónica.

El balance de masas indicó que la principal fuente de cadmio al área de estudio es el aporte de la surgencia (56.3%), en segundo término la advección horizontal de la Corriente de California (23.4%), y en un menor grado la fuente antropogénica (6.6%). El aporte natural por advección de la Corriente de California cuando tiene su velocidad mínima, llega a ser de una magnitud similar a la fuente antropogénica.

LITERATURA CITADA

- Amador Buenrostro, A. 1976. Características de las áreas de surgencia en las aguas adyacentes a la bahía de Todos Santos. Tesis Profesional. Escuela Superior de Ciencias Marinas, UABC, 54 pp.
- Amador Buenrostro, A. 1978. Análisis de vientos, corrientes y nivel de mar en una zona de surgencias cerca de Punta Colonet. Tesis de Maestría. CICESE. Ensenada, B. C. México. 32 pags.
- Bakun, A. 1975. Daily and weekly upwelling indices, west coast of North America, 1967-73. NOAA Tech. Rep. NMFS SSRF-693, 115 pp.
- Bakun, A. and C. S. Nelson. 1977. Climatology of upwelling related processes off Baja California, CalCOFI Rep., XIX: 107-127.
- Balietrieri, L. P., G. Brewer and J. W. Murray. 1981. Scavenging residence times of trace metals and surface chemistry of sinking particles in the deep ocean. Deep-Sea Res., 28: 101-121.
- Balls, P.W., 1989. Trend monitoring of dissolved trace metals in coastal sea water-a waste of effort Mar. Pollut. Bull., 20(11): 546-548.
- Barber, R.T. y R.L. Smith. 1981. Coastal upwelling ecosystems. In: A. Longhurst (ed). Analysis of Marine Ecosystems. Academic Press, New York, pp. 31-68.
- Barton, E. D. and M. L. Argote. 1980. Hydrographic variability in an upwelling area off northern Baja California in June 1976. J. Marine Res., 38(4): 631-649.
- Benigni, R. and A. Guileani. 1986. A new insight into chemical mutagenesis by multivariate data analysis. J. Theor. Biol., 121: 471-486.
- Bernstein, R. L., L. Beaker and R. Whritner. 1977. California Current eddy formation: ship, air, and satellite results. Science, 195: 353-359.
- Boyle E. A., F. Sclater and J. M. Edmond. 1976. On the marine geochemistry of cadmium. Nature, 263: 42-44.
- Boyle, E.A. 1988. Cadmium: Chemical trace deep water paleoceanography. Paleoceanography. 3(4): 471-489.

- Brewer, P. G., Y. Nosaky, D. W. Spencer and A. P. Fleer. 1980. Sediment trap experiments in the deep North Atlantic: isotopic and elemental fluxes. *J. Marine Res.*, 38: 703-728.
- Bruland, K. W. and R. P. Franks. 1978. Watercolumn trace metal chemistry (suspended particles). In: Southern California Baseline Study and Analysis; 1975-1976, Vol. II. Integrated Summary Report. Science Applications, La Jolla, CA. II 361 - II 375.
- Bruland, K. W., G. A. Knauer and J. H. Martin. 1978. Cadmium in northeast Pacific waters. *Limnol. Oceanogr.*, 23: 618-625.
- Bruland, K. W., R. P. Franks, G. A. Knauer and J. H. Martin. 1979. Sampling and analytical methods for the determination of copper, cadmium, zinc, and nickel at the nanogram per liter level in sea water. *Anal. Chim. Acta*, 105: 233-245.
- Bruland, K. W. 1980. Oceanography distribution of cadmium, nickel, and copper in the North Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 47: 176-198.
- Bruland, K. W. and R. P. Franks. 1983. Mn, Ni, Cu, Zn, and Cd in the western North Atlantic. In: C. S. Wong, E. Boyle, K. W. Bruland, J. D. Burton and E. D. Goldberg (Eds.), *Trace Metals in Sea Water*. Plenum Press, New York, 395-414.
- Bruland, K. W. 1992. Complexation of cadmium by natural organic ligands in the Central North Pacific. *Limnol. Oceanogr.*, 37: 1008-1017.
- Burton, J. D. and P. J. Statham. 1990. Trace metals in seawater. In: R. W. Furness and P. S. Rainbow (Eds.), *Heavy metals in the marine environment*, CRC Press Inc., Boca Ratón, Florida, 6-25.
- Carlucci, A.F., R.W. Eppley y J.R. Beers. 1986. Introduction to the Southern California Bight. In: R.W. Eppley (ed). *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies: Plankton Dynamics of the Southern California Bight*. Springer - Verlag, New York, 1-12.
- Cervantes Duarte, R., S. Aguiñiga García y S. Hernández Trujillo. 1992. Condiciones de surgencia asociadas a la distribución de zooplancton en San Hipólito, B.C.S. *Ciencias Marinas*, 19 (1): 117-135.

- Chávez de Ochoa, M. C. 1975. Algunas condiciones de surgencia durante la primavera de 1974, para el área adyacente a Punta Banda, B.C. *Ciencias Marinas*, (2)2:111-124
- Cota, V. A. 1971. Estudio oceanográfico químico de la surgencia localizada en la zona de Punta Banda, B. C. Tesis profesional. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B. C., México, 63 pags.
- Danielsson, L. G. and S. Westerlund. 1983. Trace metals in The Artic Ocean. *In*: C. S. Wong, E. Boyle, K. W. Bruland, J. D. Burton and E. D. Goldberg (Eds.), *Trace metals in Sea Water*, Plenum Press, New York, 85-96.
- Department of Health Services. 1992. Environmental health services response to the Point Loma outfall break on february 3, 1992. County of San Diego Department of Health Services. San Diego, Ca., 10 pp.
- Dorman E. C. and D. P. Palmer. 1981. Southern California summer coastal upwelling. *In*: P. H. Richards (Ed.), *Coastal Upwelling*, Am. Geoph. Union, Wash., D. C., 49-55.
- Eppley R. and B. Peterson. 1979. Particulate organic matter flux and plantonic new production in the deep ocean. *Nature*, 282: 677-680.
- García-Cordova, J. 1983. Variaciones hidrográficas y eventos de surgencia frente a Punta Colonet B.C. en julio de 1980. U.A.B.C. Escuela Superior de Ciencias Marinas, Tesis Profesional, 116 pp.
- Gómez Valdez, J. 1983. Estructura hidrográfica promedio frente a Baja California. *Ciencias Marinas*, 9: 75-86.
- González Morales, A.T. y G. Gaxiola Castro. 1991. Variación día a día de características fisico-químicas, biomasa y productividad primaria del fitoplancton en una zona de surgencia costera de Baja California. *Ciencias Marinas*, Vol. 17, No. 3, pp 21-37.
- Haury, L. and E. Schulenberger. 1982. Horizontal transport of phosphorus in the California Current. *CalCOFI Rep.*, XXII: 149-159.

- Hemingway, G. 1979. A description of the California current ecosystem by factor analysis. CALCofi Rep. Vol. XX: 164-177.
- Hendricks, T. J. 1976. Measurements of subthermocline currents. Coastal Water Research Project, Annual Report, 1976: 63-70.
- Hickey, B.M. 1979. The California Current System - hypothesis and facts. Prog. Oceanogr. 8:191 - 279.
- Holm-Hansen, O., C. J. Lorenzen, R. W. Holmes and J. D. H. Strickland. 1965. Fluorometric determination of chlorophyll. J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer, 30: 3-15.
- Jickells, T. D., W. G. Deuser and A. H. Knap. 1984. The sedimentation rates of trace elements in the Sargasso Sea measured by sediment trap. Deep-Sea Res., 31: 1169-1178.
- Jones, C. J. and J. W. Murray. 1984. Nickel, cadmium and copper in the northeast Pacific off the coast of Washington. Limnol. Oceanogr., 29: 711-720.
- Kin'dyushev, V.I. 1970. Seasonal Variations of Water Masses in the California Region of the Pacific Ocean. Oceanol., 10(4): pp 456 -464.
- Knauer, G. A. y J.H. Martin. 1981. Phosphorus-cadmium cycling in northeast Pacific waters. Journal of Marine Research, 39:65-76.
- Kremling, K. and D. Hydes. 1988. Summer distribution of dissolved Al, Cd, Cu, Mn, and Ni in surface waters around the British Islands. Cont. Shelf Res., 8: 89-105.
- Kremling, K, J. Olafsson, M.O. Andreae y F. Koroleff. 1983. Determination of trace metals. In: Methods of seawater analysis, K. Grasshoff, M. Ehrhard y Kremling, editors, Verlag Chemie GmbH, Weinheim, pp. 190-246.
- Kremling, K. 1985. The distribution of cadmium, copper, nickel, manganese y aluminium in surface water of the open Atlantic and European shelf area. Deep-Sea Research Vol. 32 pp. 531-535.

- Lares Reyes, L. 1988. Variación temporal de cadmio y mercurio biodisponibles en una zona de surgencias costera. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C., Ensenada, B. C., 99 pags.
- Lynn, R. J., R. A. Bliss and L. E. Eber. 1982. Vertical and horizontal distribution of seasonal mean temperature, salinity, sigma-t, stability, dynamic height, oxygen and oxygen saturation in the California Current, 1950-1978. *CalCOFI Atlas*, 30: 1-513.
- Lynn, R. J. and J. J. Simpson. 1987. The California Current system: the seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.*, 92: 12,947-12,966.
- Magnusson, B. and L. Rassmussen. 1982. Trace metal levels in coastal sea water: Investigation of Danish waters. *Marine Poll. Bull.*, 13: 81-84.
- Mancilla Peraza, M., E. Palacios Hernández y G. López Castillo. 1993. Variabilidad Hidrográfica de Bahía Vizcaíno, Baja California, México. *Ciencias Marinas*, 19(3): 265 - 284.
- Martin, J.H. and W.W. Broenkow. 1975. Cadmium in plankton: Elevated concentrations off Baja California. *Science*, 190, 884-885.
- Martin, J. H., K. W. Bruland and W. W. Broenkow. 1976. Cadmium transport in the California Current. In: H. L. Windom and R. A. Duce (Eds.), *Marine Pollution Transfers*, Heath Lexington, M. A., 159-184.
- Martin, J.H. and R.M. Gordon, 1988. Northeast pacific iron distribution in relation to phytoplankton productivity. *Deep Sea Res.* 35(2): 177-196.
- Masuzagua, T., S. Noriki, T. Kurusaki, S. Tsunogai and M. Kayomana. 1989. Compositional change of settling particles with water depth in the Japan Sea. *Mar. Chem.*, 27:61-78.
- Matsunaga, K. and K. Abe. 1985. Relationship between cadmium and phosphate in the northwest Pacific Ocean. *J. Oceanogr. Soc. Japan.*, 41: 183-187.

- Mayzaud, P., S. Taguchi and P. Laval. 1984. Seasonal patterns of seston characteristics in Bedford basin, Nova Scotia, relative to zooplankton feeding: A multivariate approach. *Limnol. Oceanogr.*, 29: 745-762.
- Mearns, A. J. 1973. Southern California inshore demersal fishes: diversity, distribution and disease as response to environmental quality. *CalCOFI Rep.*, Vol. XVII: 141-148.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. 1980. A climatology and Oceanographic Analysis of the California Pacific Outer Continental Shelf Region. U. S. Department of Commerce. National Technical Information Service, Washington, D.C., 8: 1-15.
- Neumann, G. y W. J. Pierson. 1966. Principles of Physical Oceanography. Prentice - Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J. 545 pp.
- Nishikawa Kinomura, K. A., E. A. Gutiérrez Galindo, S. A. Sañudo Wilhelmy, G. Flores Muñoz, M. Martin and M. D. Stephenson. 1988. Marine Pollution in the Central Southern California Bight Adjacent to the American-Mexican border zone. *Rev. Int. Oceanogr. Med.*, 91-92: 125-150.
- Noriki, S., N. Ishimori, K. Harada and S. Tsugonai. 1985. Removal of trace metals from sea water during phytoplankton blooms as studied with sediment traps in Funka Bay. *Japan. Mar. Chem.*, 17: 75-89.
- Noriki, S. and S. Tsugonai. 1992. Directly observed particulate fluxes of Cd, Ni and Cu in pelagic oceans: implication of two different settling particles. *Mar. Chem.*, 37: 105-115.
- Olafsson, J. 1983. Mercury concentrations in the North Atlantic in relation to cadmium, aluminium and oceanographic parameters. In: C.S. Wong, F. Boyle, K. Bruland, J.D. Burton and E.D. Goldberg (editors), *Trace Metal in Sea Water*. Plenum, New York. pp. 475 - 486.
- Ortega Lara, V. 1991. Metales traza en sedimentos superficiales marinos de la región noroccidental fronteriza México-EUA. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B. C., 75 pags.

- Parsons, T. R., Y. Maita and C. M. Lalli. 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Oxford, 173 pp.
- Pavía, E. y S. Reyes. 1983. Variaciones espaciales y estacionales del viento superficial en la Bahía de Todos Santos, B.C. Ciencias Marinas, 9(1): 151- 167.
- Petersen, J. H., A. E. Jahan, R. J. Lavenberg and R. S. Grove. 1986. Physical chemical characteristics and zooplankton biomass on the continental shelf off Southern California. CalCOFI Rep., 27: 36-50.
- Pineda, J. 1991. Predictable upwelling and the shoreward transport of planktonic larvae by internal tidal bores. Science. vol. 253, pp. 548-551.
- Pond, S. and G. H. Pickard. 1978. Introductory Dynamic Oceanography. Pergamon Press. Oxford, 241 pp.
- Popham, D. F. and J. M. D'Auria. 1983. Statistical approach for deciding on mussels (*Mytilus edulis*) that have been collected from a water body polluted with trace metals. Environ. Sci. Technol., 17: 576-582.
- Price, N. M. and M. M. Morel. 1990. Cadmium and cobalt substitution for zinc in a marine diatom. Nature, 344: 658-660.
- Reid, V.L., G.L. Roden y J.G. Wyllie. 1958. Studies of the California. Current System. Calcofi. Rep. 1 July 1956-1 January 1958, 29-57.
- Reid, J. L. 1963. Measurements of the California counter current off Baja California. J. Geophys, Res., 68: 4819-4822.
- Reid, J.L., Jr. y C.G. Worrall. 1964. Detailed measurements of a shallow salinity minimum in the thermocline, Journal of Geophysical Research, 69, 4767-4771.
- Reid, J.L. 1973. The shallow salinity minimum of the Pacific Ocean. Deep Sea Res. 20, 51-68.
- Roemmich, D. 1989. Mean Transport of mass, heat, salt and nutrients in Southern California coastal waters: implications for primary production and nutrient cycling. Deep-Sea Res., 36: 1359-1378.

- Sakamoto-Arnold, C. M., A. K. Hanson, D. L. Huizenga and D. R. Kester. 1987. Spatial and temporal variability of cadmium in Gulf Stream warm-core rings and associated waters. *J. Marine Res.*, 45: 201-230.
- Sánchez Rodríguez, R. 1990. El medio ambiente como fuente de conflicto en la relación binacional México-Estados Unidos. El Colegio de la Frontera Norte, Tijuana, B. C., 134 pags.
- Sañudo-Wilhelmy, S. A. and A. Russell-Flegal. 1991. Trace element distributions in coastal waters along the US-Mexican boundary: relative contributions of natural processes vs antropogenic inputs. *Mar. Chem.*, 33: 371-392.
- Simpson, J.J. 1984. El Niño - induced onshore transport in the California Current during 1982-83. *Geophys. Res. Vol. lett.*, 11, 233-236.
- Slauenwhite, D. E. and P. J. Wangersky. 1991. Behaviour of cupper and cadmium during a phytoplankton bloom: a mesocosm experiment. *Mar. Chem.*, 32: 37-50.
- Southern California Coastal Water Research Project. 1987. Coastal Research Project: Annual Report, 1987, Long Beach, CA., 101 pp.
- Southern California Coastal Water Research Project. 1989a. Recent changes and long term trends in the combined mass emissions discharged into the Southern California Bight. Annual Report, 1989, Long Beach, CA., 20-28.
- Southern California Coastal Water Research Project. 1989b. Marine Outfalls: 1987 inputs from waste water treatment plants, power plants and industrial facilities. Annual Report, 1989, Long Beach, CA., 30-37.
- Southern California Coastal Water Research Project. 1990. Annual Report, 1989-90, Long Beach, CA., 102 pp.
- Southern California Coastal Water Research Project. 1992. Characteristics of effluents from large municipal wastewater treatment facilities in 1990 and 1991. Annual Report, 1989, Long Beach, CA., 1-8.
- Sverdrup, H.U., M.W. Johnson y R.H. Fleming. 1942. The oceans, their physics, chemistry and general biology. Prentice - Hall, Englewood Cliffs. N.J. 1087 pp.

- Takano, K. 1955. Note on the convective circulation. *Rec. Oceanogr. Works Japan*, 2: 9-20.
- Torres Moye, G. y M. J. Acosta Ruiz. 1986. Algunas propiedades químicas indicadoras de eventos de surgencia costera y de la contracorriente subsuperficial en una área cercana a Punta Colonet, Baja California. *Ciencias Marinas*, 12: 10-25.
- Tsuchiya, M. 1976. California undercurrent in the Southern California Bight. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations, Reports*, 18, 155 - 158.
- Wangersky, P. J., S. B. Moran, R. J. Petti, D. E. Slauenwhite and X. Zhou. 1989. Biological control of trace metal residence times: an experimental approach. *Mar. Chem.*, 28: 215-226.
- Wilkinson, L. 1990. SYSTAT: The systems for statistic. SYSTAT, Evaston, IL. 882
- Wooster, W.S. y J.H. Jones. 1970. California Undercurrent off northern Baja California. *J. Mar. Res.* 28, 235-250.
- Yeasts, P.A. y J.M. Brewers. 1983. Potential anthropogenic influences on trace metal distributions in the North Atlantic. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*. 40 (Suppl 2): 124-131.
- Yeast, P. A. and J. A. Campbell. 1983. Nickel, copper, cadmium and zinc in northwest Atlantic Ocean. *Mar. Chem.*, 12: 43-58.
- Yeast, P. A. 1988. Manganese, nickel, zinc and cadmium distribution at the fram 3 and Cesar ice camps in the Arctic Ocean. *Oceanol. Acta*, 11: 383-388.